МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Восточноукраинский национальный университет им. В. И. Даля

В. В. Леваничев

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОВМЕСТНОЙ ЭКСТРУЗИИ В УСЛОВИЯХ ЕДИНИЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Монография

2016

УДК 678+532.135
ББК 35.719
Л 34

Публикуется по решению ученого совета университета
(протокол № 6 от 25.02.2016)

Рецензенты:

М. А. Гликин, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологий органических веществ, топлива и полимеров, Технологический институт ВНУ им. Даля, г. Северодонецк.

В. Н. Смолий, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электронных аппаратов, Технологический институт ВНУ им. Даля, г. Северодонецк.

Д. А. Демин, д-р техн. наук, профессор кафедры литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков

Леваничев В. В.
Разработка технологии совместной экструзии в условиях единичного производства: Монография / Леваничев В. В. – Х. : Восточноукраинский национальный университ им. В. И. Даля, 2016. – 220 с.

ISBN 978-617-7319-02-2

В монографии проведен анализ современных способов ускорения переходов, переналадок в процессах соэкструзии, способов прогнозирования и управления качественными характеристиками полимерных изделий в условиях елиничного производства. Исследованы процессы смешивания, управления температурой расплава и производительностью экструдера при постоянных сменах рецептур. Предложены методы расчета процессов переработки пластмасс на основе представления движения расплава в виде пробки скользящей по поверхности каналов течения. Исследовано многослойное течение и метод переменной скорости вращения шнеков соэкструдера для ускорения переходов по цвету пленки. Данная монография рекомендована для студентов, инженеров и ученых занимающихся технологией соэкструзии гибких упаковочных материалов.

Табл. 74 Ил. 69 Библиогр. 83

УДК **678+532.135**
ББК 35.719
Л 34

ISBN 978-617-7319-02-2

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

Глобальный рынок упаковочных материалов каждый год растет на 3.3%, при этом доля жесткого пластика и гибкой упаковки растет быстрее по сравнению с другими материалами [1].

Многослойная гибкая упаковка постоянно совершенствуется и развивается, причем метод соэкструзии это наиболее перспективный способ получения многослойных материалов, в основном из-за своей экономичности и технологичности, так как многослойный продукт получается в одну стадию.

Развитие соэкструзионной технологии идет по пути увеличения количества слоев при уменьшения толщины каждого слоя, что бы общая толщина пленки значительно не изменилась. Уже создано оборудование с количеством слоев 17 и 21, при этом обеспечивается минимальная толщина отдельных слоев 1мкм, при ширине пленки 1200мм и общей толщине 100-1000мкм. Такая технология соэкструзии получила название *нанослойная технология* (nanolayer technology). Изучается возможность создания 30 слойных пленок [2].

Следует отметить следующую тенденцию: крупные производители полимерных материалов BASF, LANXESS, Du Pont, UBE концентрируясь на определенных полимерах и развивая их потребительские свойства, выпуская их различные модификации, значительно расширяют технологические возможности гораздо более мелких предприятий, выпускающих многослойные материалы методом соэкструзии. То есть серьезные научные исследования в области полимерных материалов как бы непропорционально усиливаются благодаря применению новых материалов в многослойных структурах и соэкструзионных технологиях.

Современное соэкструзионное производство гибких многослойных упаковочных полимерных материалов является многономенклатурным, в некоторых случаях мелкосерийным или единичным.

Исследования технологий экструзии и соэкструзии проводились для установившихся процессов. Закономерности, возникающие при переходах между номенклатурами (в процессе переналадок), изучены мало.

Количество таких переналадок в смену может достигать пяти. В зависимости от структуры заказов, поступающих в производство, коэффициент закрепления операций $К_{ЗО}$ меняется от 5 до 40, при этом тип производства варьируется от крупносерийного до единичного. Потери времени на переналадки могут достигать 20% в смену, соответственно увеличиваются отходы, снижается качество, повышается себестоимость готовой продукции. При этом массовая производительность оборудования постоянно растет.

Соэкструзионное производство пленки имеет производительность 10-1000кг/час, стоимость сырья составляет 40-80% в стоимости полимерной упаковки, при этом потери сырья в смену на переналадки может достигать 10% от номинальной производительности линии. В отличии, например от процессов обработки металлов резанием, процесс экструзии отличается тем, что переналадка не только снижает коэффициент использования оборудования, но и дополнительно увеличивает отходы и износ оборудования. Поэтому ускорение переналадок, снижение отходов сырья является актуальной задачей.

При одинаковых процессах вторичного формования (раздув, ориентация, намотка и т.д.) совместная экструзия, по сравнению с экструзией однослойных пленок, имеет значительно больше вариантов модификации свойств упаковки, поскольку введение добавок и красителей в каждый слой может достигать 30% по сравнению с 10% для монопленки.

Расширение номенклатуры многослойных пленочных материалов обусловлено следующими факторами:

1. Значительное развитие ассортимента исходных полимерных материалов позволяющих придать уникальные свойства многослойной упаковке, что выделяет ее на рынке и может эффективно использоваться в коммерческих целях.

2. Пленка полученная методом соэкструзии зачастую является полуфабрикатом и требует проведения вспомогательных процессов до собственно процесса упаковки. Предприятия, использующие многослойную пленку как исходное сырье, выставляют различные дополнительные требования по качеству и параметрам пленки.
3. Развитие оборудования вспомогательных процессов (печать, вакууммирование, пайка пакетов и т.д.), когда номинальная производительность машин, выполняющих по сути одну и ту же технологическую операцию, может меняться в десятки даже сотни раз. Поэтому значительно различается объем потребления и соответственно объем заказов разных клиентов на близкие типоразмеры пленки.
4. Доступность прогрессивных упаковочных технологий и оборудования вспомогательных процессов для малых предприятий, что позволяет организовать изготовление конкурентоспособной упаковки (например пакетов) без значительных капиталовложений.
5. Развитие систем управления процессом совместной экструзии на основе гравиметрического или объемного дозирования расплава, что позволяет изменить технологические режимы фактически за несколько минут, что значительно повышает гибкость оборудования.

Большинство переналадок требует замены рецепта исходного сырья. Это влияет на температурный профиль экструдера и противодавление, соответственно изменяются расходно-массовые характеристики экструдера. И хотя режимы устанавливаются достаточно оперативно, существует ряд операций, которые занимают основное время при переходе: замена сырья в накопительных бункерах, промывка и стабилизация экструдера и головки, наладка процесса вторичного формования.

Итак современное соэкструзионное производство даже трудно назвать мелкосерйным, некоторые номенклатуры могут быть уникальными и эксклюзивными, то есть ориентированными на одного клиента.

Поэтому требуется разработка специальных технологий запусков, остановок и переналадок, необходимо обеспечить минимальные затраты времени и сырья на переход с изготовления одного типа пленки на другой. Технология переходов должна быть универсальной, иметь обобщенные методологии и способы переходов, так как некоторые номенклатуры может выполняться один-два раза в год, а условия производства постоянно меняются, качество и производительность необходимо выдержать на требуемом уровне.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю В.А.Ульшину за обсуждение многих вопросов изложенных в настоящей монографии; своим коллегам В.В.Дядичеву, Т.М.Терещенко, Т.И.Ларченковой за анализ и обработку некоторых экспериментальных данных.

Раздел 1. Анализ процессов переналадок при изготовлении гибких упаковочных материалов методом соэкструзии.

Главным направлением использования пластиковых многослойных пленок, несомненно, является упаковка, хотя определенное значение имеют агротехническое, медицинское и промышленное назначения. В пищевой упаковке полимерные пленки применяются как сами по себе (термоусадочные, стретч-пленки, скин-пленки, барьерные, ламинированные, металлизированные, «дышащие», «молочные», водорастворимые, биоразлагаемые пленки), для изготовления различного рода пакетов и мешков, контейнеров (жесткие пленки), так и в виде части многосоставной и многослойной упаковки [3].

1.1 Основные задачи и этапы создания многослойных структур.

Обширный ассортимент упаковочных материалов обусловлен многообразием пищевых продуктов и широким диапазоном требований, предъявляемых к упаковке. Эти требования могут быть подразделены на общие и специфические – зависящие от природы продукта, условий его технологической обработки и хранения.

Общие требования зависят от явных требований к продукту без учета которых группа продуктов определенной категории просто не может упаковываться в данную упаковку.

Во-первых, это пищевая безопасность упаковки в условиях наполнения, хранения и эксплуатации, максимально влияющих на материал упаковки, например если продукт разогревается в упаковке, то не должно происходить разложения упаковки и миграции вредных веществ в продукт на уровне опасном для человека.

Во-вторых, основные характеристики продукта, например при упаковке рыбы должно учитываться наличие острых кромок и соответственно обеспечена высокая стойкость пленки на прокол.

В-третьих, это обеспечение требуемого уровня барьерных свойств, упаковка должна гарантированно предотвратить порчу продукта в течении всего срока хранения то есть выполнить свою основную функцию.

Также следует отметить общее требование экологии - возможность утилизации упаковки после использования, без вреда для окружающей среды, это общая проблема для всех полимерных пленок. Следует отметить, что есть перспективные наработки в этом направлении, в том числе с применением технологии соэкструзии [4] и прессования полимерных материалов с минеральным наполнителем.

Многослойные пленки разрабатываются с учетом свойств, которые придаются отдельными слоями упаковке в целом. Когда определены общие свойства упаковочных пленок для пакуемого продукта и пакующего оборудования, необходимо сравнить их со свойствами отдельных слоев [3].

На основе анализа общих требований к упаковке и свойств полимерных материалов можно определить основную конфигурацию многослойной структуры, какие материалы будут применяться и возможные варианты их расположения. Фактически, располагая набором полимеров с разными свойствами, можно как в конструкторе создать любую структуру, в зависимости от потребностей рынка и задачи производителя продукции.

Структуры многослойных полимерных материалов, применяемых в упаковочной технике методом соэкструзии достаточно хорошо изучены [5]. Но постоянно создается что-то новое, поэтому нельзя точно сказать какая многослойная структура является оптимальной или даже рациональной. Например только для барьерной упаковки (искусственных колбасных оболочек) за последние 20 лет разработано более 10 структур (табл. 1.1), которые и сегодня являются актуальными и применяются различными фирмами для промышленного производства оболочки. Такое многообразие многослойных структур используется для одних и тех же условий применения и по сути оболочки конкурируют между собой. Многое зависит от развития

продукта, маркетинга, рекламы, сервиса, соотношения цена-качество, конкретных требований клиента [6].

В таблице 1.1 приведены этапы развития многослойных рукавных термоусадочных полиамидных пленок (оболочек) изготавливаемых по методу тройного раздува (Three-bubble) для производства колбасных изделий и основные свойства достигаемые такими структурами.

Таблица 1.1

Структуры рукавных термоусадочных полиамидных пленок (оболочек)

№ этапа	К-во слоев	Типичная структура Внеш.слой <–––––> Внутр.слой	Описание
1 1995г	3	PA/Tie/PA, PA/PA/PA,	Улучшены свойства однослойных оболочек, повышены барьерные свойства, снижена толщина, повышена укрывистость
2 2003г	5	PA/Tie/LDPE/Tie/PA, PA/Tie/LLDPE/Tie/PA, PA/Tie/PP/Tie/PA, PA/Tie/ EVOH /Tie/PA LDPE/Tie/PA/Tie/PA PA/EVOH/PA/Tie/PP PA/EVOH/PA/Tie/Surlin	Повышен барьер по влаге за счет полиэтилена, снижена сырьевая себестоимость, повышена эластичность, полипропилен позволяет стерилизовать продукт в сочетании с низкой паропроницаемостью, улучшена цветовая гамма.
3 2012г	7	PA/EVOH/PA/Tie/LLDPE/Tie/PA, LDPE/Tie/PA/Tie/HDPE/Tie/PA PET/Tie/LLDPE/Tie/HDPE/Tie/PA	Повышена механическая прочность, улучшены барьерные свойства в сочетании со снижением себестоимости, улучшена возможность введения модифицирующих добавок.

Принятые сокращения:

PP - полипропилен; PE - полиэтилен; PA - полиамид; PET - полиэтилен терефталат; Tie - адгезив; Surlyn - иономер (морозостойкий эластомер), производимый фирмой Дюпон; LDPE - полиэтилен низкой плотности; HDPE - полиэтилен высокой плотности; EVOH – сополимер этилена с виниловым спиртом, LLDPE – линейный полиэтилен низкой плотности.

Таким образом на стадии проектирования определяется базовая структура и основные характеристики многослойной упаковки, такие как толщина слоев, цвет, а также технология ее изготовления.

Следующим этапом является уточнение качественных характеристик многослойной упаковки с учетом специфических требований к фасуемому продукту. На этом этапе разрабатываются нюансы и ноу-хау которые обеспечивают конкурентные преимущества продукции, рассчитывается требуемая производительность процесса. Далее разрабатываются и проводятся организационно-технические мероприятия по внедрению продукта.

1.2 Сравнительный анализ структуры отходов при переходах в процессах экструзии и соэкструзии.

Процесс соэкструзии, по сравнению с экструзией однослойной пленки, имеет повышенные отходы в процессах замены рецепта. Обычно переход это замена рецепта или другими словами промывка одного слоя, но экструдера других слоев не выключаются, так как необходимо сохранить форму и прочность расплава трубчатой заготовки для вторичного формования. Также отключение одного экструдера в соэкструзионной установке может привести к выдавливанию расплава через этот экструдер в загрузочную горловину, что приведет к аварийной остановке всей линии.

Поэтому был проведен сравнительный анализ статистических данных по уровню отходов затрачиваемых на переходы в производствах однослойной и многослойной пленках (п - период равен 1 месяцу).

Таблица 1.2

Сравнительный анализ потерь производства однослойной и пятислойной пленки

Процесс	Тип отходов	п1	п2	п3	п4
Экструзия однослойной пленки (25кг/ч)	Всего отходов, кг	2787	2750	3864	1140
	Отходы по переходам, кг	447	229	530	190
	Отходы по переходам, %	16,0	8,3	13,7	16,7
Соэкструзия пятислойной пленки (40кг/ч)	Всего отходов, кг	2827	2920	1765	3030
	Отходы по переходам, кг	1530	1347	829	1607
	Отходы по переходам, %	54,1	46,1	47,0	53,0

Анализ данных таблицы 1.2 показывает что удельный вес отходов на переходы в процессах соэкструзии возрастают в 3-5раз по сравнению с экструзией монопленки. Но приведенные данные показывают абсолютные значения, поэтому не позволяют обобщить данные.

Для прогнозирования предполагаемой экономии при повышении эффективности процесса перехода необходимо более глубоко рассмотреть структуру отходов, провести анализ в привязке к удельным потерям по отношению к общему расходу сырья и затратам времени.

Таблица 1.3

Процентное соотношение отходов в объеме переработанного сырья.

Отходы (экструзия)	п1	п2	п3	п4	п5	п6	п7	Среднее
всего, %	8,0	9,8	10,6	12,8	9,0	7,0	9,1	9,5±1,7
1. внеплановые (аварийные поломки оборудования, функциональная нестабильность процесса), %	3,3	4,5	4,9	7,6	3,8	2,4	4,4	4,4±1,5
2. планируемые (подналадка процесса, контроль качества, переходы), %	4,7	5,3	5,0	5,2	5,2	4,7	4,7	5,0±0,3
2.1 -в том числе отходы на переходы, %	1,0	1,5	0,8	1,5	1,3	1,8	1,4	1,3±0,3

Продолжение таблицы 1.3

Отходы (соэкструзия)	п1	п2	п3	п4	п5	п6	п7	Среднее
всего, %	6,4	6,7	7,5	6,6	8,6	6,0	9,5	7,3±1,2
1. внеплановые (аварийные поломки оборудования, функциональная нестабильность процесса), %	2,5	2,2	2,5	2,5	3,2	1,6	4,0	2,7±0,7
2. планируемые (подналадка процесса, контроль качества, переходы), %	3,9	4,5	5,0	4,2	5,4	4,4	5,4	4,7±0,5
2.1 -в том числе отходы на переходы, %	2,9	3,4	3,2	2,7	4,3	2,7	4,3	3,4±0,6

Анализ данных таблицы 1.3 показывает, что по сравнению с экструзией монопленки процесс соэкструзии более стабилен, это можно объяснить наличием системы гравиметрического дозирования, и более надежным поведением многослойного материала в процессе деформации при растягивании пленки. Многослойная структура как бы перераспределяет неоднородности и дефекты возникшие в какой-то точке рукава в одном слое не приводят к порывам и аварийной остановке всей линии. Но явное различие между процессами наблюдается в уровне отходов на переходы. Возможная экономия сырья для процессов соэкструзии (при повышении эффективности переналадки) может составлять 2% от общего количества израсходованного сырья. Ожидаемый экономический эффект также связан с повышением фактической производительности на 2%, так как вместо отходов линия изготавливает продукцию.

1.3 Технологические операции выполняемые при переналадке оборудования.

В процессе технологических переходов при производстве полимерной упаковки изменяются параметры готовой продукции, основные из них следующие:

- толщина пленки, размер (диаметр и ширина рукава);

- цвет пленки, декоративные элементы (шероховатость, структурированная поверхность и т.д.);
- физико-механическое характеристики (жесткость, прочность, стойкость к проколу, эластичность, усадка);
- поверхностные свойства (поверхностная энергия, коэффициент трения);
- барьерные характеристики (газопроницаемость, паропроницаемость, стойкость к УФ излучению).

Рассмотрим операции выполняемые на линии в процессе переналадки.

Таблица 1.4

Перечень операций переналадки линии для изготовления новой номенклатуры изделий

№ операции	Описание	Влияние за затраты времени и отходы.
1	2	3
1	Замена рецепта в подающих бункерах (станции подготовки рецепта)	Проводится перед окончанием изготовления предыдущей номенклатуры
2	Промывка расплава в соэкструзионной головке и экструдере	Требует специальных методик для минимизации потерь времени, все операции «подстраиваются» под промывку
3	Термостабилизация экструдера после изменения заданной температуры (при необходимости)	Проводится в процессе выполнения промывки (операция №2)

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3
4	Выход экструдера на стабильную производительность	При соответствующем мастерстве операторов проводится в процессе выполнения промывки (операция №2)
5	Стабилизация процессов вторичного формования.	При соответствующем мастерстве операторов проводится в процессе выполнения промывки (операция №2)

Каждый из указанных параметров требует специальных методик для минимизации времени и отходов, но наиболее трудно управляемое, дающее максимальное количество отходов и сложно прогнозируемо это время промывки. Время промывки зависит не только от текущих параметров сырья и технологические режимы, но и предыстория: предшествующая номенклатура и текущее состояние соэструзионной головки, которое в свою очередь зависит от времени и качества эксплуатации в течении от трех месяцев до нескольких лет [7].

Затраты времени могут быть частично совмещенными. Совмещение операций зависит от умений обслуживающего персонала, организации работ, конструктивных элементов оборудования, степени автоматизации линии.

1.4 Анализ системы подготовки рецепта в процессах переналадки.

Замена рецепта в подающих бункерах не является сложной задачей для соэкструзионной технологии. При проектировании линии необходимо учитывать конструктивные решения, обеспечивающие свободный доступ к нижней части бункера. Время замены рецепта в бункере совмещается со временем работы линии.

Проблемы возникают при повышении электризованности транспортных, накопительных элементов загрузочной системы и гранул исходного сырья. В этом случае часть гранул «зависают» в бункере, прилипают к стенкам накопительных элементов, полная очистка становится трудоемкой задачей. Применение сырья с антистатическими добавками решают эту задачу.

Если линии оснащена автоматизированной системой подготовки рецепта, на время замены сырья влияют конструктивные решения системы дозирования, смешения и накопления композиции, схема расстановки датчиков и алгоритм управления работой дозатора. Рассмотрим функциональную схему станции подготовки рецепта и варианты расстановки датчиков контроля наполнения бункера (рис. 1.1). Для нормальной работы дозатора достаточно одного датчика контроля количества материала. Положение датчика выбирается исходя из производительности системы транспортирования гранул. При установке двух датчиков (в верхней и нижней части бункера) минимизируется объем материала, который необходимо заменить при переналадке, при этом уменьшается объем отходов.

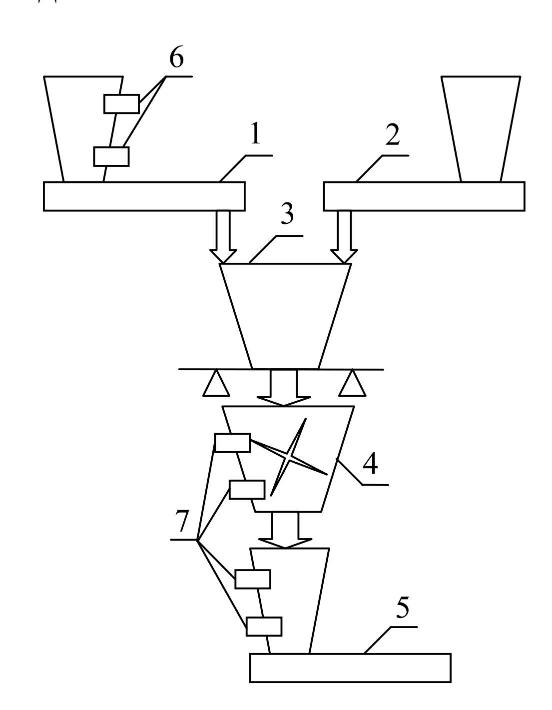


Рис. 1.1. Функциональная схема станции подготовки рецепта:
1 – дозатор основного компонента, 2 – дозатор ключевого компонента, 3 – весовой бункер, 4 – смесительный бункер, 5 – экструдер, 6, 7 – датчики контроля наполнения бункера

Второй фактор, влияющий на потери времени в процессе перехода, это объем смесительных, накопительных и промежуточных бункеров. Бункер должен иметь достаточный объем для стабильной работы системы автоматической загрузки и дозирования и обеспечивать время для текущих работ по обслуживанию дозатора и засыпке новых порций сырья. С другой стороны, для ускорения переналадки, необходимо минимизировать объемы накопительных бункеров.

Применение автоматической станции подготовки рецепта не гарантирует однородности смеси подаваемой в экструдер, так как стабильность рецепта определяется конструктивными и технологическими параметрами смесителя, набором параметров которые настраиваются наладчиком и контролируются автоматической системой управления станцией. Необходимо отметить большое разнообразие предлагаемых конструктивных элементов и ноу-хау фирм производителей подобного вида оборудования.

Качество смеси зависит от однородности гранулометрического состава полимеров, наличия статического электрического заряда на гранулах, возможности накапливать статические заряды на поверхностях бункеров, плотности гранул различных компонентов, времени смешивания, скорости работы лопастей дозатора, объема одной дозы, производительности дозатора. Существует также определенная точность дозирования каждого компонента, например относительная погрешность дозирования компонента с вводом 3% в рецепт, может составлять до 25% (в единичной дозе при нормально работающем дозаторе). Также использование широкого ассортимента гранулированных полимерных материалов требует постоянного контроля и корректировки технологии смешивания [8].

Критерии качества работы систем подготовки рецепта отсутствуют, хотя практика показывает что стабильность воспроизведения рецепта является первым технологическим параметром влияющим на основные производственные показатели производительность, себестоимость, качество.

Поэтому развитие систем дозирования и подготовки рецепта в процессах соэкструзии требует новых методов контроля технологических процессов.

1.5 Анализ факторов влияющих на время замены сырья в экструдере и головке.

Соэкструзионная головка проектируется с точки зрения обеспечения минимальной разнотолщинности каждого слоя для заданного диапазона вязкостей, давлений и производительности. Время пребывания полимера в головке косвенно связано с застойными зонами. Чем больше вероятность возникновения таких зон, тем больше время замены рецепта. Конструктивные параметры, если учитывать время пребывания, противоречивы. С одной стороны увеличение объема копильника улучшает гибкость головки с точки зрения переработки полимеров с различным индексом течения и вязкостью, с другой стороны увеличенный объем копильника повышает время пребывания полимера в головке.

Практические наблюдения в условиях производственного процесса показывают, что основными факторами, которые влияют на время замены рецепта в соэкструзионной головке и экструдере, а также уровень отходов при промывке, являются соотношение вязкости текущего и нового рецептов ***m1/m2***, абсолютные значения объема экструдера ***Vэ*** и головки ***Vг***, отношение этих объемов ***Vэ/Vг***. При изготовлении окрашенных пленок важно учитывать количество красителя в рецептуре слоя и то как происходит переход от более светлого цвета к более темному или наоборот, при этом всегда наиболее длительный (затратный) переход – с окрашенной на бесцветную пленку [9].

При проектировании экструдера основными параметрами является производительность, степень сжатия, диаметр экструдера, отношение длины к диаметру, глубина канала в зоне дозирования. Время пребывания полимера в экструдере рассматривается как вспомогательный параметр. Одним из показателей отражающих время пребывания в экструдере может служить так

называемый коэффициент обратного потока ***a = Qp/Qd,*** который отражает насколько расплав тормозится за счет противодавления в головке. Чем выше коэффициент, тем выше степень смешивания, но тем больше время пребывания полимера в экструдере.

Поэтому актуальной является задача разработки конструктивных и технологических решений направленных на минимизацию времени пребывания полимера в головке и экструдере при сохранении требуемой производительности и стабильном качестве.

1.6 Анализ существующих способов ускорения промывок.

Согласно исследованиям [10] для ускорения промывок предлагается применять переменную скорость вращения шнека, так как различный уровень сдвиговых деформаций приводит к изменению профиля скорости и вымываются разные участки канала. Низкие скорости сдвига вымывают застойные зоны.

Рекомендуется заменить сложно вымываемые узлы изготовив их быстросъемными, например фильтр расплава.

Снижение температуры на 5-10^{0}С для узлов, где более низкая скорость течения и возможно образование застойных зон, таким образов увеличивается вязкость расплава в этом узле и повышается интенсивность промывки.

Снижение температуры цилиндра при подаче промывочного полимера для повышения его вязкости и хорошего контакта с частями оборудования.

Необходимо подбирать материалы с максимально близкой реологией, так как индекс вязкости расплава MFI может быть не показательным из-за неизвестного индекса течения и зависимости вязкости от скорости сдвига и температуры, поэтому при промывке вязкость может значительно снизиться. Предлагаются разные чистящие добавки, в целом они работают, но может быть сложно вымыть сами добавки поэтому желательно чтобы чистящий компаунд

был низковязкий. Необходимо обращать внимание на рекомендуемые температуры использования компаунда.

Применять смеси с адгезивами которые хорошо совместимы со многими полимерами например EAA (сополимер этилена с акриловой кислотой) и LDPE начинать 50/50 постепенно переходя на состав 90% LDPE и 10% EAA, постепенно полностью убирая EAA.

В качества промывочных компонентов чистящего компаунда применяются абразивные материалы (мел, тальк, стеклосферы), ПАВы, термостабилизаторы. Основа компаунда обычно выбирается одинаковая с вымываемым материалом таким образом достигается максимальная совместимость и межфазное взаимодействие. Различные способы рецептирования чистящего состава направлены на повышение совместимости и диффузии компонентов чистящей смеси в вымываемый компонент тем самым повышая уровень воздействия и интенсивность очистки.

Итак вязкость и реология наиболее неопределенные параметры для управления промывкой. Так как с одной стороны высокая вязкость нового состава ускоряет промывку предыдущего состава, но затем сложно вымыть сам высоковязкий рецепт.

1.6.1 Метод переменной скорости Disco Purge.

Метод очистки Disco Purge предлагается компанией Du Pont заключается в переменной скорости работы экструдера. Метод достаточно глубоко проработан и открыт для коммерческого использования.

Содержит следующие основные разделы:

1. Изменение скорости.
2. Применение всепенивающего полиэтилена с минеральным наполнителем.
3. Применение сополимеров этилена для ускоренной промывки.
4. Пример наблюдения за промывкой с оценкой качества.

Согласно [11] по методу очистки Disco Purge промывка проводится на разных скоростях вращения шнека

- 1st minute at 30% of maximum RPM
- 2nd minute at 90% of maximum RPM
- 3rd minute at 50% of maximum RPM
- 4th minute at 15% of maximum RPM
- 5th minute at 70% of maximum RPM
- minutes 6-10 at 15-20% of maximum RPM
- minutes 11-15 -- repeat the cycling steps of the first 5 minutes

Конкретные значения оборотов не имеют значения (то есть рекомендуемый % от максимальной скорости может варьироваться в широком диапазоне). Важно то, что нарушается структура скоростей и напряжений сдвига и создается новое распределение скоростей и скоростей сдвига. Одной минуты на каждой скорости вращения достаточно, чтобы обеспечить развитие нового распределения напряжений и скоростей. На низких оборотах лучше вымывается полимер, который застрял (застоялся) в изгибе канала, есть высокая вероятность того что между промывкой и материалом в застойной зоне возникнет адгезионное взаимодействие.

При более высоких оборотах скорость материала на стенке выше и полимер вымывается со стенок цилиндра и головки. Периоды высокой производительности имеют более важное значение для эффективной очистки.

Время промывки варьируется от 15 минут для экструзии листов и покрытий до 30-45 минут при экструзии пленки с раздувом.

Необходимо отметить, что время промывки 15 минут можно предложить в качестве своеобразного норматива, например фирма Macro Канада, для своих новых соэкструзионных головок также заявляет, что промывка на новый цвет составляет не более 15минут. Но это для тестовых испытаний на этапе отладки нового оборудования.

Для оценки эффективности предложенной методики проводилось сравнение при различных условиях:

1. очистка проводится на постоянных оборотах, и при подаче нового полимера обороты не меняются;
2. очистка по методу Disco Purge как описано выше (30%, 90%, 50%, 15%, 70%);
3. грубая очистка, когда скорость шнека меняется в диапазоне между 90% и 10% от максимальной каждые 5 минут;
4. очистка чистящей смесью DuPont PE6611 (полиэтилен с пенообразователем) с минеральным наполнителем диоксид кремния.

Использовались следующие смолы

- Surlyn ® 1652 MI = 5,0 г/10 мин (бесцветный),
- Nucrel® 1207 MI=7,0 г/10 мин (бесцветный),
- LDPE 1540 MI = 6,5 г/10 мин (окрашен в белый цвет для контроля промывки).

Рассмотрены два варианта первоначальных условий когда в экструдере LDPE и промываемся с помощью Surlyn и Nucrel и наоборот.

Промывка с помощью LDPE 1540 показала себя хорошо. Так как при температурах переработки 280-290^{0}С его вязкость оказалась выше чем у Surlyn. На экструдере диаметром 100мм было потрачено в среднем 45кг сырья и 15мин времени.

Использование чистящего материала PE6611 привело к быстрой очистке от начального материала, но затем сложно вымывался сам чистящий компаунд. Общие отходы составили 225кг, поэтому такой подход для обычных промывок при переходах неэффективен, но использование чистящих добавок рекомендуется при сильных загрязнениях когда произошла деструкция материала в экструдере, например при аварийных ситуациях.

Качество промывки оценивалось по 10-ти бальной шкале, приняты следующие критерии по уровню качества: 8-мь баллов достаточно для последующей продажи пленки то есть достаточный уровень качества промывки; 10 баллов полная замена материала.

Таблица 1.5

Описание процесса перехода при замене цвета

	Переход от белого LDPE на прозрачный Nucrel		Переход от прозрачного Nucrel на белый LDPE
0	новая смола еще не видна	0	белого пока не видно
1	начинает проступать новый материал	1	начинает идти белый цвет
2	пленка по прежнему молочного цвета	2	можно увидеть четкие прозрачные линии по центру
3	можно различить уже несколько прозрачных полос	3	полосы шириной более 1 дюйма
4	по две полосы шириной более 6-ти дюймов еще белого цвета	4	от 1/2 до 1 дюйма шириной прозрачные полосы
5	более 5-ти дюймов две полосы с обоих сторон	5	от 1/8 до 1/2 дюйма прозрачные полосы
6	более 4-х дюймов белого цвета	6	менее 1/8 дюйма прозрачные полосы
7	более 2-х дюймов белого цвета	7	тонкая прозрачная линия четко по двум сторонам
8	менее 1 дюйма молочного цвета	8	очень трудно увидеть по краям полосы молочного цвета
9	белая линия исчезла но по краям молочный цвет	9	еще видно края молочного цвета
10	прозрачная пленка	10	полностью белая пленка

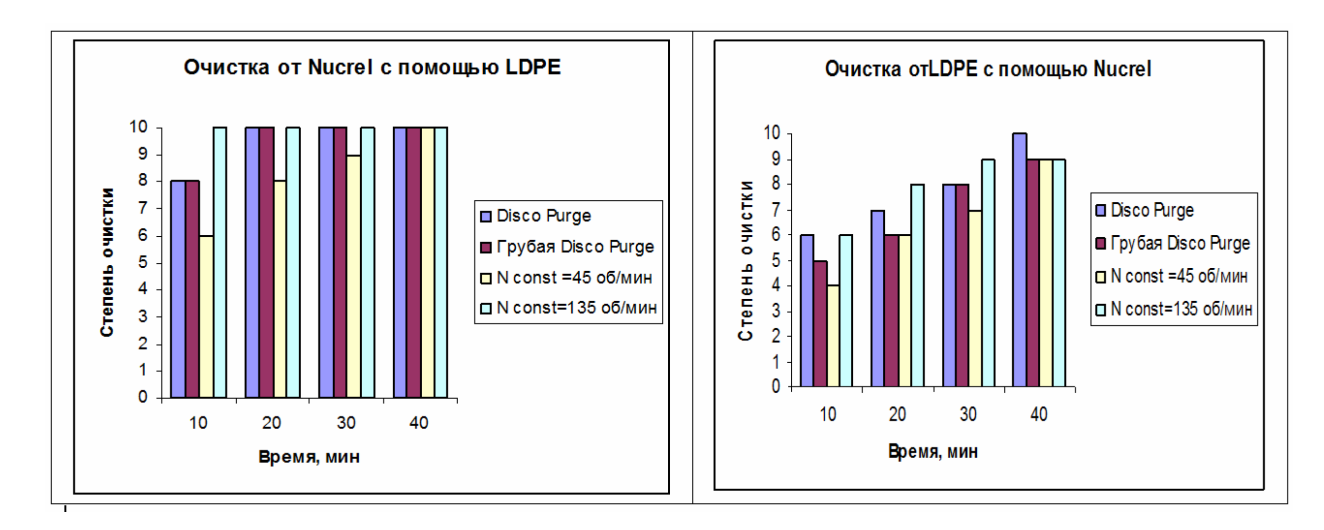


Рис. 1.2. Зависимость времени очистки от последовательности используемых материалов

Работа на повышенной скорости 135 об/мин дает 20% экономии времени по сравнению с Disco Purge, но выше отходы на 30%.

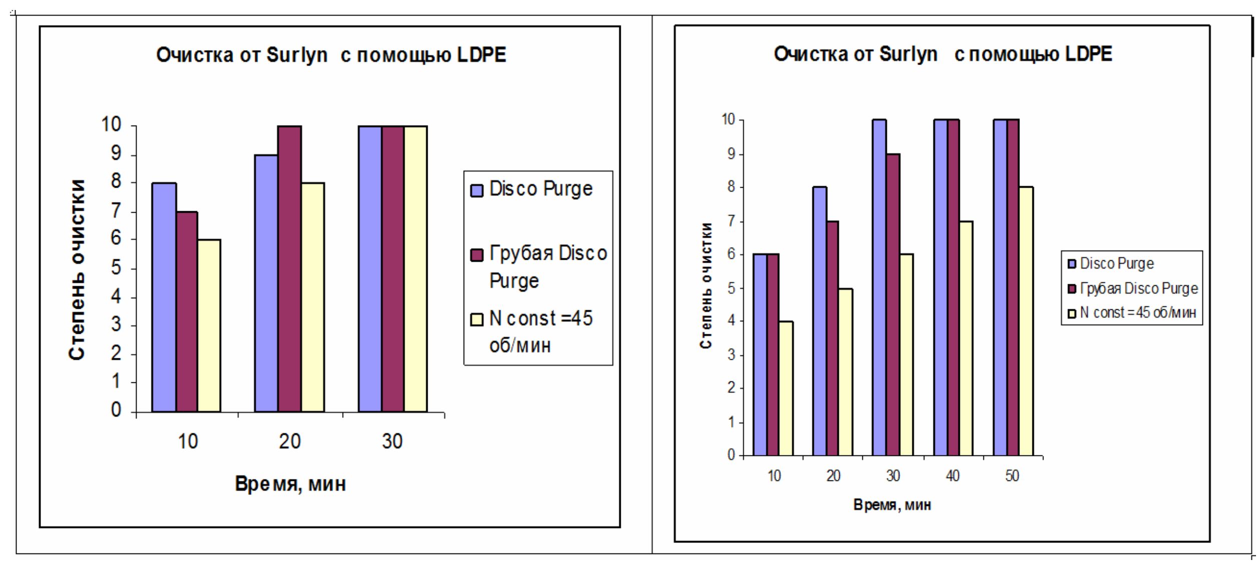


Рис. 1.3. Зависимость времени очистки от последовательности используемых материалов

Различия в методах были более очевидными в запуске, где Surlyn использован чтобы очистить экструдер от LDPE 1540. При методе Disco Purge использовано 79 кг материала и 25 минут времени. Метод грубой очистки занял на 20% больше времени, и на 10% больше использовано материала. Работа на постоянной скорости при 45 оборотах (максимум оборотов шнека было 270) был наименее эффективным.

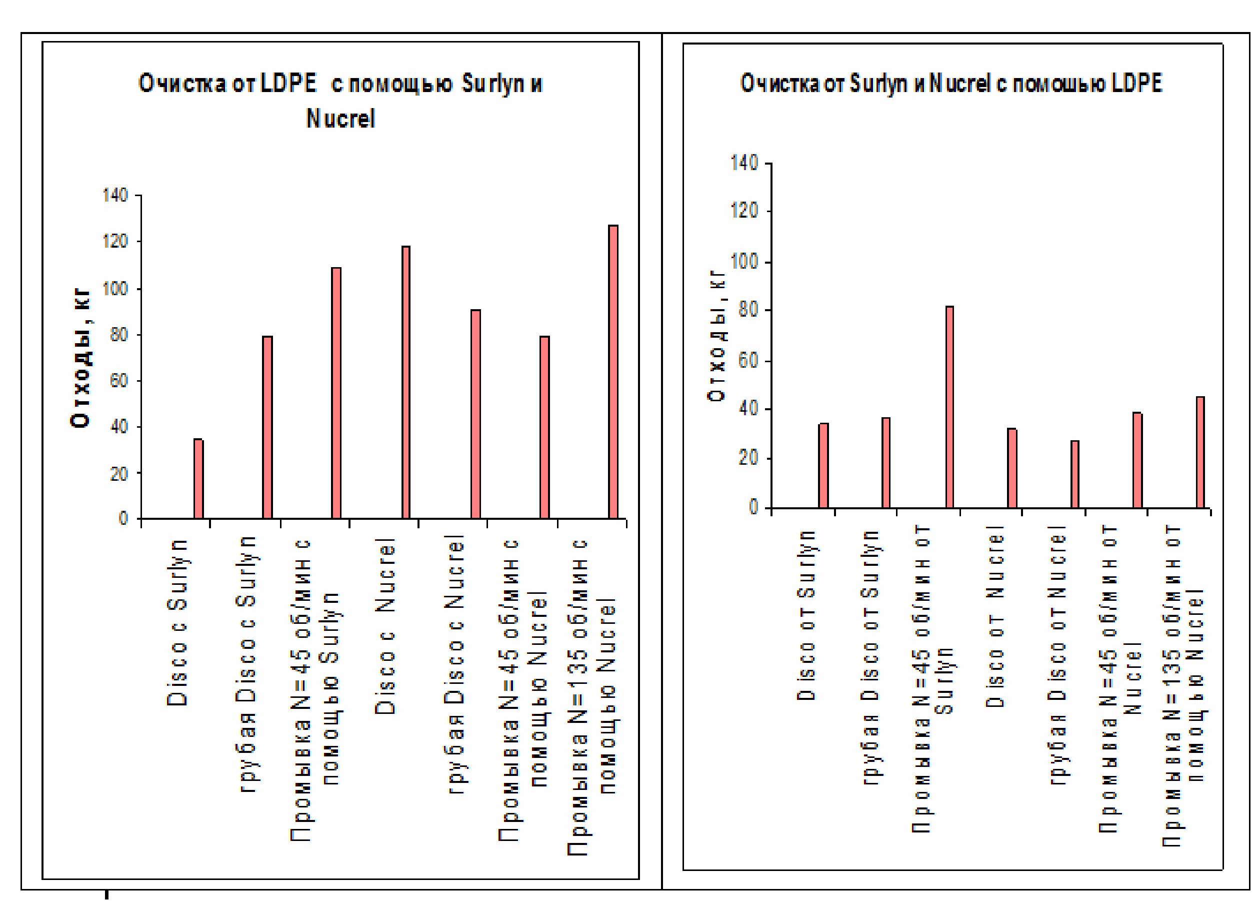


Рис. 1.4. Зависимость отходов при промывке в зависимости от метода и используемого материала

Анализ метода и данного исследования показывает, что не учтено влияние красителя на время и отходы при промывке. Переход с помощью LDPE 1540 (окрашенного в белый цвет) на бесцветные Surlyn или Nucrel, в среднем показало снижение отходов и времени в 2 раза, независимо от способа управления скоростью. В исследовании заявляется, что это влияние вязкости при температуре переработки, но приведенный уровень MI это не подтверждает.

Также нет анализа следующего факта: метод Disco Purge при очистке с помощью Surlyn показал в 3 раза лучше результат чем при очистке с помощью Nucrel, в то же время при промывке при постоянной скорости N=45об/мин, наоборот очистка с помощью Nucrel показала в 2 раза лучше результат чем очистка с помощью Surlyn.

1.6.2 Метод переменной скорости при соэкструзии.

Системы управления ускоренной промывкой представлена фирмой Macchi S.p.A. на выставке К-2010 [12].

Соэкструзионная 9-слойная линия показывалась в работе в сложных выставочных условиях. Линия оснащена 9-ю экструдерами диаметром 55мм. На линии производится пленка с барьерными слоями, расположенными между слоями металлоорганического и линейного LPDE с использованием специального полимера для связывания слоев. Для успешной работы линии инженеры Macchi осуществляли ежевечернюю процедуру остановки оборудования с промывкой каналов расплава, чтобы разложение термически чувствительных полимеров не вызывало проблем с запуском линии на следующий день.

Организация подобной процедуры стала возможна благодаря использованию программного обеспечения Easy Control PPS, которое разработано Macchi, которое позволяет проводить быстрые последовательные изменения скорости шнека. Полная очистка длиться 15минут при использовании 130кг материала. Другим системам промывки может требоваться 30 минут времени и около 500кг материала.

Согласно патента [13] для ускорения промывки используется переменная скорость при соэкструзии.

Схема процесса содержит блок контроля и управления, который через контроллер обеспечивает управление приводами экструдеров. Экструдера оснащены гравиметрической системой дозирования. Соэкструзионная головка, содержит винтовой распределитель потока, дорн и матрицу.

Методика предлагается для системы с четырьмя и семью экструдерами. Для системы с четырьмя экструдерами на графиках [13] показано как проводится в динамике изменение скорости экструдера A, где вымывается материал и изменение скорости экструдеров B C D, при это общая производительность вначале промывки снижается, а затем остается постоянной.

Методика для семи экструдеров. Здесь промывка проводится для экструдера E, скорость экструдеров F, G, H, I, J, K меняется таким образом чтобы компенсировать изменение производительности экструдера E и производительность линии сохранить постоянной. Таким образом избегают разрыва экструдируемой многослойной пленки и интенсифицируют промывку. Также указывается что время промывки на разных скоростях различается из-за использования чистящих материалов, и на этапе $\mathbf{a_4}$, когда чистящая добавка заполнила каналы, требуется меньше времени чем на этапе $\mathbf{a_1}$.

Следует отметить, что предлагаемый метод переменной скорости одного или нескольких экструдеров является наиболее перспективным и технологичным в условиях единичного производства.

1.6.3 Методы использования чистящих добавок.

Согласно [14] в современных экструдерах использование смесительных элементов, с одной стороны они повышает качество расплава и процесса, но ухудшается способность к промывке при переходе на другой цвет или полимерную композицию. Предлагается интенсифицировать промывку с помощью вспенивающей добавки, которая добавляется в композицию в гранулированном виде и вспенивается при прохождении через экструдер при нагревании, тем самым очищает каналы течения расплава от загрязнений и остатков деградировавшего материала. Вспенивание увеличивает локальное давление внутри экструдера и тем самым усиливается действие промывочного материала на стенки каналов путем изменения скорости течения в застойных зонах.

Согласно [15] одна из проблем переработки полимеров это постепенное накопление его на стенках шнека, цилиндра, каналов головки, что приводит к увеличению среднего времени пребывания полимера в экструдере в 5-500раз, это усиливает подгорание полимера и меняет цвет изделия. Предлагается использовать реактивные соединения для очистки оборудования по переработке полимеров, когда используются катализаторы разрыва

полимерных цепей очищаемого полимера, в этом случае снижается его температура плавления и вязкость и таким образом облегчается очистка. В качестве катализаторов предлагается применять гидроксиды и оксиды щелочных металлов, также добавляется вода и применяется полимерная основа которая не реагирует с водой в присутствии катализатора.

Согласно [16] для промывки используется композиция состоящая из термопластика (А) с высокой температурой плавления (выше 200С) и кристалличностью не более чем 50% и термопластика (В) с низкой температурой плавления который используется как носитель расплав для тугоплавкого полимера. Процесс промывки должен проходить при температуре ниже точки плавления термопластика (А). Соотношение материалов (А и В) может значительно варьироваться, доля материала (В) в рецепте может лежать в диапазоне от 5 до 95%.Такая композиция очень эффективна и не приводит к износу оборудования. Полимер (А) при промывке легко деформируется и проходит через узкие части канала, вытягиваясь в тонкие нити.

Вероятно эффект очистки объясняется изменением уровня адгезии полимера к металлу при температуре размягчения и высокой вязкости полимера (А).

Видимой проблемой применения подобной композиции является возможность задержки и застоя гранул не расплавившегося полимера (А) на сетке или в каналах сложной конфигурации, особенно если вязкость полимера (В) будет значительно ниже чем полимера (А).

Согласно [17] для промывок при переходе по цвету предлагается использовать композицию состоящую из пигмента (цвет на который переходим) вспенивающую добавку, связующее (предпочтительно воск), вспенивающий агент увеличивает объем расплава в 30раз, агент выбирается экзотермическим или эндотермическим или их сочетание, важно чтобы вспенивание происходило не менее чем на 25С ниже чем температура переработки.

Согласно [18] проблемой является образование пленки расплава на частях оборудования, качественная промывка достигается использованием мягких абразивных материалов (карбоната кальция, фосфата кальция, силиката кальция и силиката алюминия) и сульфированных ПАВ

Согласно [19] для очистки предлагается использовать композицию состоящую из полимера (В) и содержащую до 10 весовых процентов соль щелочноземельного металла. Важным является уровень адгезии полимера (В) с вымываемым полимером (А), предлагается выбирать полимер (В) таким образом чтобы адгезия составляла 50-1500 грамм/15мм. Адгезия проверяется на пленке полученной соэкструзионным литьем, двухслойной пленки из слоев полимеров А и В.

Также полимерная композиция может дополнительно содержать третий полимер (С), который добавляется в объеме 50 процентов во второй полимер (В) при этом должно обеспечиваться следующие параметры вязкости смеси (В и С): соотношение индекса расплава смеси MI-mix60/MI-mix6 должно быть в пределах от 0,3 / 1 до 5/1, где

MI-mix60 это индекс расплава (г/10 мин) смеси (при 2160г) и при температуре на 20°С выше температуры плавления смеси, после выдержки смеси в расплаве в аппарате для измерения MFI в течение 60 минут,

MI-mix6 измеряется в аналогичных условиях, но время выдержки составляет 6 минут.

То есть важным параметром является совместимость и термостойкость чистящей смеси.

1.6.4 Методы улучшения промывки путем совершенствования оснастки и оборудования

Разработки по ускорению промывки также проводятся в направлении модернизации оборудования и оснастки.

Например по информации [20] новая головка для производства семислойной пленки X-Series компании Alpine исключает образование линий

стыка между материалами с низким распределением молекулярной массы и позволяет быстрее менять цвет. Для производства барьерной пленки, Alpine продемонстрировала свою новую семислойную головку X-Series. Соэкструзионная головка с боковым питанием позволяет исключить линии от входных отверстий в пленке, поскольку спирали работают во внутренней части цилиндра, а не на внешней. Как сообщают в компании Alpine, отверстия имеют круглое сечение, а не полукруглое, что позволяет обеспечить более ламинарный поток, а это позволяет сократить продолжительность очистки и изменения окраски до 15 минут. После выставки семислойная головка отправилась в лабораторию Alpine для проведения испытаний для заказчиков. Ее особенно выгодно использовать при работе с материалами, имеющими небольшое распределение молекулярной массы, для которых характерно образование линий входа.

Согласно информации [21] при экструзии пленок с раздувом нередки случаи деструкции материала в застойных зонах экструдера, ведущие к ухудшению качества расплава, а затем к разрушению фильтра. Последние исследования показывают, что данная проблема возникает из-за отложений на экструзионных шнеках, а не в раздувной головке как считалось раньше. Даже в смесительных узлах изготовленных под заказ, где предусматриваются специальные элементы, позволяющие улучшить смешивание не удается избежать наличия мертвых зон в которых образуются отложения. Материал прилипает к шнеку, затем кусочки отрываются от него что приводит к повышению температуры расплава, эффективность работы шнека снижается и ухудшается качество. Для решения проблемы фирмами Ibanez Extrusoras. S.L. и U.B.Tech GmbH предлагается новая конструкция смесительного узла где количество застойных зон сведено к минимуму. Расплав частично поступает в специальные отверстия в шнеке и промывается через его внутреннюю часть, а также снаружи, затем смешивается, что создает прямонаправленный поток материала обеспечивающий эффект самоочищения. Это приводит к

повышению эффективности работы шнека, а также направляющих функций цилиндра.

Согласно патента [22] The Japan Steel Works, Ltd. ускорение промывки достигается за счет переключения потока расплава во вторую головку.

Первый блок (A) гранулирования для литья расплава одного цвета и второй блок (B) гранулирования для литья расплава другого цвета. Гранулы любого цвета подаются в двухшнековый экструдер. Затем расплав поступает в адаптер, после адаптера расположен переключатель потока который направляет поток расплава в соответствующую головку. Каждая головка снабжается шестеренчатым насосом и фильтром расплава.

Согласно патента [23] фирмы Gala Industries, Inc ускорение наладки процесса грануляции достигается путем последовательного подключения двух головок – с низкой и высокой производительностью

Для ускорения запуска сложного процесса, процесса с высокой производительностью, снижение потерь при пуске, предлагается использовать переключающий клапан имеющий различные рабочие положения. Расплав сначала подается в головку с меньшей пропускной способностью 2500кг/час, а затем когда процесс стабилизируется, отрегулирован требуемый уровень качества и поток расплава увеличится, клапан направляет поток в головку с высокой производительностью (пропускной способностью) 4500кг/час. Тем самым достигается значительная экономия сырья.

Патент Bemis Manufacturing Company [24] Для ускоренной смены цвета предлагается использовать жидкие красители и подавать прямо в загрузочную зону экструдера.

В зоне загрузки цилиндра ближе к началу зоны плавления через специальный канал подается краситель под давлением в жидком виде. К преимуществу такого способа относится высокое качество распределения красителя и соответственно равномерность окрашивания, также в точке введения красителя максимально близко к зоне плавления обеспечивает минимальное загрязнение экструдера красителем. К важным моментам

изобретения относится конфигурация канала для подачи красителя и то, что используется насос низкого давления, это снижает стоимость приспособления.

Согласно патента [25] фирмы The Japan Steel Works, Ltd существует проблема настройки и обеспечения непрерывной работы гранулятора при высоких уровнях производительности (не менее 1000кг/час). В процессе грануляции может меняться производительность процесса и вязкость расплава. Для обеспечения оптимального гранулирования используется конструкция головки с переключающим клапаном и минимум двумя матрицами и соответствующими блоками резки гранул. Матрицы имеют разное количество отверстий и приспособлены под разную вязкость и/или производительность экструдера.

В патенте [26] разработана конструкция соэкструзионной головки которая имеет высокую скорость очистки и качество пленки. Указывается что из-за того что полимеры имеют функцию памяти, на участках пленки которая имела негативное воздействие высокого напряжения и температуры может появиться матовая полоса или волнистый участок. Патентуемая головка позволяет изготовить пленку, где нет четко очерченных границ между кольцевыми потоками расплава, за счет специальной конструкции распределительных каналов, чередования кольцевых и спиральных участков. Также спиральные каналы расположены не на внешней а на внутренней поверхности. Важным моментом является зеркальная поверхность распределителей расплава.

1.6.5 Анализ применения процессинговых добавок.

Исследования по способам улучшения процесса перекачки высоковязких жидкостей проводились наиболее интенсивно в нефтедобывающей промышленности. Согласно [27] применяется метод, когда перекачка высоковязкой жидкости (мазут, нефть) происходит внутри кольцевого пристенного слоя из маловязкой жидкости. Согласно этому способу, высоковязкая и маловязкая жидкости подаются в трубопровод таким образом,

что жидкость с меньшей вязкостью образует у стенок трубы устойчивое кольцо, внутри которого движется высоковязкая жидкость. Поскольку наибольшие градиенты скоростей сдвига приходятся на пристенный слой, то тем самым обеспечивается заметное снижение потерь напора, которое будет тем выше, чем контрастнее вязкости транспортируемой жидкости и маловязкой среды и чем больше толщина пристенного слоя. Однако, начиная с некоторого значения, повышение пропускной способности за счет увеличения толщины пристенного слоя оказывается меньшим ее снижения, вызванного сокращением доли высоковязкой жидкости в общем потоке. Поэтому объемное содержание маловязкой жидкости не рекомендуется увеличивать свыше 40-45 %. Минимальное содержание ограничивается главным образом устойчивостью пристенного слоя.

Процессинговые добавки для переработки полимеров формируют относительно устойчивый пристенный слой который улучшает течение и повышает эффективность процесса экструзии, действуя как смазывающий слой. Например, в патенте [28] Киевского политехнического института, предлагается вводить процессинговые добавки непосредственно в тот участок экструдера и головки где требуется их присутствие. По сравнению со стандартным применением добавок, путем подмешивания в основную композицию, предлагаемый способ значительно повышает эффективность их действия и не приводит к изменению качества пленки. Действие добавок приводит к снижению нагара на металлических поверхностях каналов головок и экструдера и повышает качество поверхности экструдируемой пленки. Исследования проводились на лабораторном экструдере с диаметром червяка 45 мм с экспериментальной трубной головкой. Как полимерное сырье использовали линейный полиэтилен низкой плотности с ПТР 5г / 10мин, как процессинговый примесь вводили полидиметилсилоксан в количестве 0,05%, который подавали на внутреннюю поверхность корпуса головки. Процесс проводили без добавления и с добавлением примеси при одинаковых температур и производительности. В опытах без добавления процессинговой

добавки давление на входе в головку составлял 16-20МПа, а в опытах с добавлением примеси - 13-17МПа. При одинаковом давлении 16МПа производительность без примеси составила 20кг/ч, а с примесью - 28кг/час. Таким образом уменьшить энергозатраты, увеличить производительность и улучшить качество поверхности изделий, не увеличивая количества процессинговых добавок.

Подобная технология под названием «инкапсулирования» предлагается для переработки термореактивных пластмасс (фирма Macro, Канада), в этом случае вводится дополнительный (обволакивающий) слой в зоне адаптера экструдера перерабатывающего термореактивный полимер.

Для частичного решения проблем возникающих при промывках экструдера и головки в настоящее время предлагаются процессинговые добавки с дозировкой от 0,3 до 5%. Основное влияние процессинговых добавок заключается в формировании на стенках головки и экструдера смазывающего слоя [29].

При этом производители таких добавок декларируют следующие улучшения:

- ускорение запуска экструдера с уменьшением расхода сырья;

- повышение стабильности ширины и толщины пленки во время экструзии;

- обеспечение возможности изготовления более широких и более тонких пленок без смены головки;

- повышение качества пленки из сырья низкого качества;

- уменьшение количества нагара в головке экструдера;

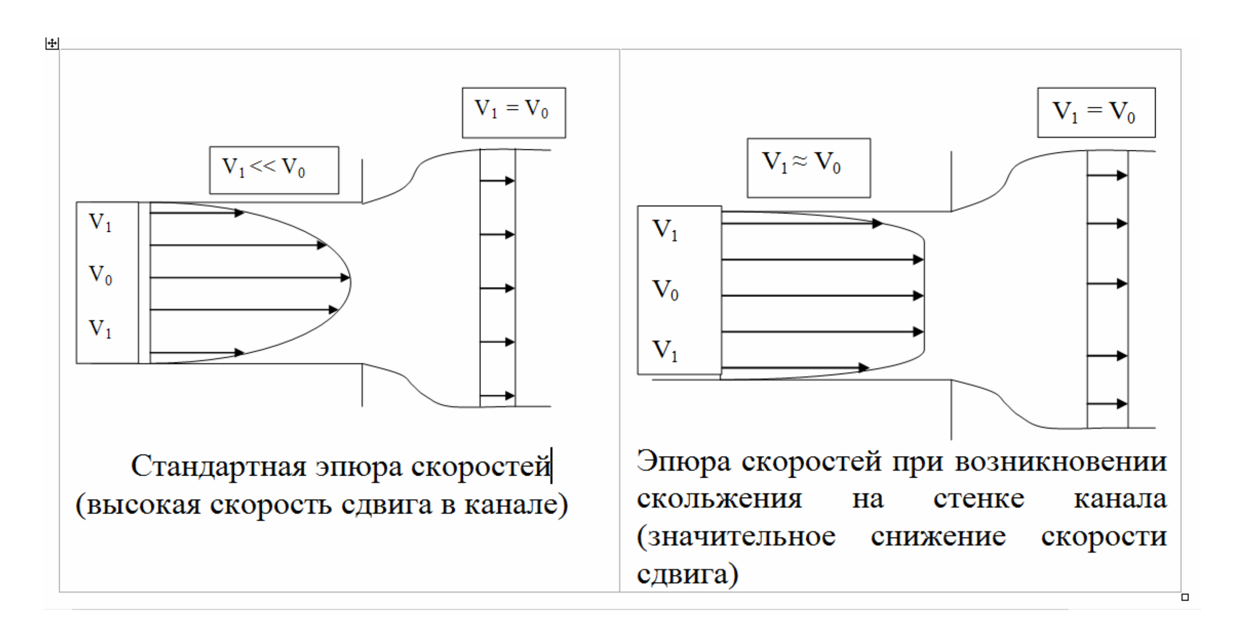
- снижение частоты замены фильтрующих сеток;

- обеспечение полного использования вторичного сырья при его переработке в пленку.

Для создания динамического покрытия рекомендуется начать работу, добавляя при экструзии 5-8% концентрата в течение 30-40 минут, а при литье 2-3% на первые 5-10 изделий. Первым признаком положительного эффекта

введения добавки является снижение давления на головке (или крутящего момента и токовой нагрузки на привод). Затем следует дождаться стабилизации параметров на пониженном уровне (5-10 мин) и снизить процент ввода до 0,3-0,5% для полиолефинов и до 0,3% для полистирола и полиамида. После этого можно повысить скорость вращения шнека и производительность или понизить рабочие температуры в последних зонах экструдера на 30-40º. При этом давление должно повыситься, но остаться на уровне или чуть ниже первоначального значения. Концентрат экструзионной добавки формирует динамический слой, который возобновляется при постоянном введении новой порции концентрата. Через некоторое время после прекращения введения концентрата этот слой пропадает. При передозировке добавки возможно проскальзывание расплава по шнеку и снижение подачи материала.

Согласно [30], после формирования смазывающего слоя на стенках обеспечивается скольжение расплава по металлическим стенкам, уменьшается скорость сдвига, изменяется (выравнивается) эпюра скоростей (рис. 1.5). Как следствие уменьшается время замены расплава в экструдере на 20-30% (с 50 до 35минут). Наличие смазывающего слоя приводит к снижению крутящего момента на шнеке, давления в головке, повышению производительности при снижении энергозатрат. При этом устраняется налипание нагаров на головке, обеспечивается экструзия композиций чувствительных к температуре, появляется возможность изготовления более тонких пленок. Кроме того процессинговые добавки обладают моющим действием и снижают время чистки оборудования при смене цвета.



Стандартная эпюра скоростей (высокая скорость сдвига в канале)

Эпюра скоростей при возникновении скольжения на стенке канала (значительное снижение скорости сдвига)

Рис. 1.5. Изменение эпюры скоростей течения расплава при использовании процессинговых добавок

Частично проблемы связанные с переналадками можно решить с помощью пластифицирующих и чистящих концентратов. Пластифицирующие концентраты предотвращают сшивку и термоокислительное старение вторичных полимеров, облегчают их переработку за счет улучшения свойств расплава (повышения ПТР), улучшают физико-механические характеристики пленочных изделий. Чистящие концентраты применяют для быстрой и экономной чистки экструзионного оборудования при переходах по цвету. Концентрат содержит минеральный наполнитель, обладающий слабым абразивным действием и ПАВ.

Применение различных добавок это один из путей решения технологических проблем в условиях единичного производства. Но возникает ряд дополнительных вопросов:

1. Влияние добавок на свойства пленки. Декларируется повышение прочности при применении процессинговых добавок, но комплекс физико-механических свойств и его связь с комплексом требований к качественным характеристикам это постоянный вопрос в динамично развивающихся предприятиях, непрерывно расширяющих ассортимент выпускаемой продукции.

2. Совместимость со всеми компонентами, которые стандартно применяются в рецептурах. Компонентов может быть более 100 ед, причем отдельные виды применяются раз в год.

3. Работоспособность добавки во всем диапазоне температур и скоростей. Ряд номенклатур могут изготавливаться на граничных режимах переработки полимера, соответственно добавка должна иметь более широкий диапазон переработки по сравнению с полимером основы. Например, термостойкость суперконцентрата красителя 300ºС обеспечивает его стабильную переработку в диапазоне 200-250ºС. Если термостойкость красителя снижается до 280ºС, возникают проблемы при переналадках, пусках и остановках линии, поскольку в этом случае могут происходить «забросы» температуры в процессе стабилизации режимов.

4. Критерии оценки работы добавки, экономическая целесообразность ее применения.

5. Технологичность добавки, с учетом того что контролируемых параметров может быть более 100, и при этом в процессе перехода может меняться более 30 технологических параметров.

1.7 Некоторые практические наблюдения влияния пристенного течения в процессах экструзии.

При переработке полиамида, когда линия остановлена при включенном обогреве на 1 час и при этом скорость шнека равна нулю – происходит подгорание сырья. Если установить скорость вращения шнека 1 об/мин (при этом рабочая частота экструдера – 100 об/мин), наблюдается отсутствие подгорания в течении 10 часов с момента остановки линии. При малой скорости вращения шнека время пребывания полимера в экструдере больше в 100 раз по сравнению со временем при рабочей скорости процесса. Следовательно, незначительное движение расплава в экструдере обеспечивает отсутствие деструкции расплава полимера. С другой стороны, незначительная по времени остановка вращения шнека приводит к подгоранию сырья. Такое

противоречие невозможно объяснить с помощью моделей течения расплава, которые имеют допущение, что линейная скорость полимера на стенке канала равна нулю.

Существует прямая зависимость между временем эксплуатации головки и временем промывки при переходах по цвету. То есть чистота поверхности канала и его коррозионная стойкость влияют на время промывки.

Приведу еще ряд результатов наблюдений:

- применение 5% процессинговой добавки на основе фторэластомера и полиэтилена при промывке слоя LPDE при переходах по цвету ускоряет промывку в 1,5-2раза;
- добавление лубрикантов в слой, улучшает его распределение снижает разнотолщинность для слоя толщиной 12мкм на 1-2мкм, то есть на 8-16%;
- добавление 0,5% лубрикантов или 10% белого суперконцентрат красителя с 50% двуокиси титана, стабилизирует производительность экструдера даже при его износе.

Итак, процессы пристенного течения влияют на технологические параметры экструзии и соэкструзии, их анализ и контроль требуется при замене рецепта, при проведении остановок и пусков экструдера, при промывках при загрязнении каналов течения расплава.

1.8 Виды покрытий применяемых для обработки каналов течения расплава в экструдере и головке.

Для обеспечения скольжения расплава по поверхностям формующего современного оборудования применяются различные покрытия (рис 1.6).

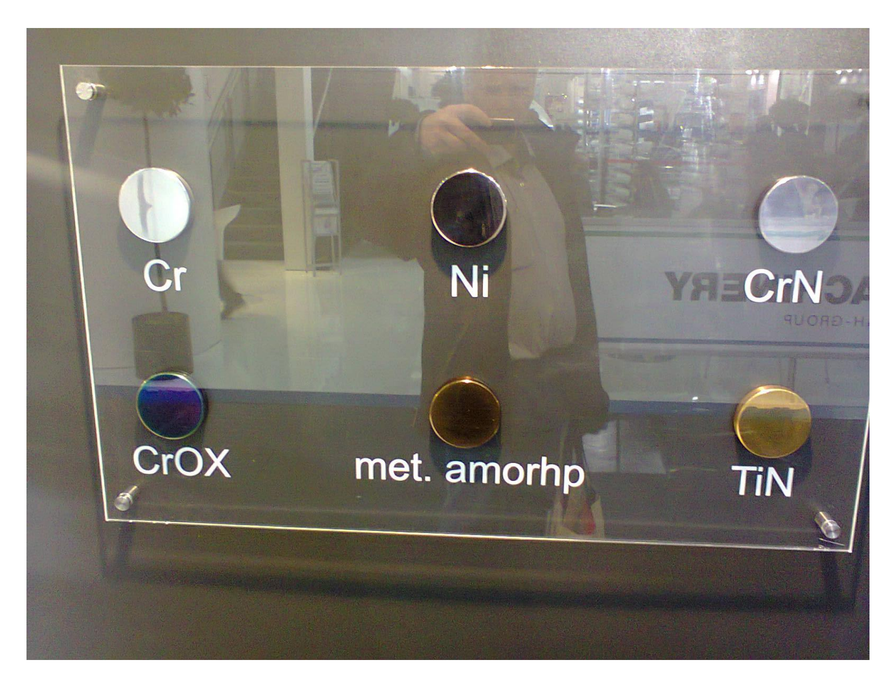


Рис. 1.6. Внешний вид типичных покрытий каналов течения расплава

Механизм действия покрытия каналов течения расплава аналогичен с работой процессинговых добавок, которые формируют смазывающий слой на стенках и обеспечивают скольжение расплава на стенках. То есть наличие покрытия приводит к тому что уменьшается время замены расплава в экструдере, снижается крутящий момент на шнеке, давление в головке, повышается производительность при снижении энергозатрат, устраняется налипание нагаров на головке, обеспечивается экструзия композиций чувствительных к температуре, снижается время чистки оборудования при смене цвета.

Таблица 1.6

Сравнительные характеристики различных покрытий

Тип покрытия	Толщина, мкм	Твердость HV	Износостойкость	Коррозионная стойкость
Cr	25	950	4	2
Ni	25	550	2	5
PVD, TiN	4	2500	3	2
PVD, CrN	4	2100	3	3
PVD, CrN multiplayer	8	2100	4	4

Покрытие никелем или хромом это стандартное, классическое решение. В зависимости от того что важнее коррозионная стойкость или износостойкость выбирают тип покрытия [31]. PVD покрытия имеют более высокую твердость и низкую адгезию к расплаву, поэтому более предпочтительны при переработке термочувствительных расплавов и полимеров с высокими адгезионными свойствами. К недостаткам PVD покрытий относится сложность покрытия отверстий (отношение глубины к диаметру не более 1). Свойства различных типов покрытий [32] приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7

Свойства различных типов покрытий

Параметр	CrN	CrN - multilayer	CrN - modified	TiN	TiCN	Metall amorph
Твердость, HK	2100 - 2500	2100 - 2500	2200 - 2700	2300 - 2800	2800-3300	1800
Температура, max, °C	650	650	700	500	400	700
Пластичность	+++	+++	++	++	+	+++
Цвет	Steel gray	Steel gray	Multicoloured	Gold Gray	copper	copper
Толщина, мкм	2-5	3-9	3-9	2-6	2-3	2-4

К новому виду покрытий относят аморфные металлы, которые имеют более низкую шероховатость поверхности и более качественную структуру (без пор и микротрещин) по сравнению с PVD покрытиями, при этом могут наноситься внутри глубоких отверстий, с отношением глубины к диаметру до 10.

Качество поверхности каналов оборудования влияет на отходы при переходах, исследования в этом направлении очень трудоемкие так как экструдера и головки работают по 10-15лет и учесть все факторы которые влияют на изменение времени промывки практически невозможно, да и сами покрытия и технологии их нанесения непрерывно совершенствуются.

Из практических наблюдений:

- если сравнить азотированную головку и головку с покрытием CrN – modified, то применение покрытия при работе с расплавом PA6+PVA уменьшает так называемый эффект потения головки “die droop” в 2-3 раза,

таким образом период между чистками фильеры щупом, увеличивается с 4 до 12 часов.

- при работе на изношенных парах шнек-цилиндр нередки ситуации когда после перехода на безцветную композицию (стандартный переход 0,5часа) экструдер как бы в обратном порядке «вспоминает» все предыдущие цвета и в течении одной - двух смен (12-24часа), рулоны в случайном порядке могут окрашиваться различными цветами предыдущих красителей.

- соэкструзионная пятислойная головка (поверхность азотированная) проработавшая 1 год в условиях единичного производства, после чистки и полировки, обеспечивает снижение отходов при переходах по цвету в 1,5-2 раза.

1.9 Современные проблемы моделирования процессов течения расплавов полимеров.

Развитие моделей течения расплавов полимеров идет в направлении расширения используемых физических характеристик для прогнозирования технологических свойств полимерных материалов по результатам анализа реологической кривой.

Можно выделить следующие общепринятые модели:

- степенной закон и полиномиальное уравнение, модели позволяют определить вязкость при скоростях сдвига близких к нулю;
- модели Bueche-Harding, Ellis fluid model, Carreau model, Cross model, дополнительно включают время релаксации полимера и константу вязкости при низких и высоких скоростях сдвига.
- Cross-WLF модель, где вместо времени релаксации введено критическое напряжение сдвига, при котором происходит переход к ньютоновскому течению в области высоких скоростей сдвига.

Для описания полной реологической характеристики общепринятыми являются Ellis model, Carreau model, Cross model [33–37]. Есть и другие модели

развития степенного закона, где предлагается воспользоваться взаимосвязью индекса течения со скоростью сдвига и температурой [38].

В связи с расширением и модификацией полимерных материалов, созданием различных композиций и сополимеров, развитием технологических добавок, появилась задача создания моделей течения учитывающих скольжение на стенке канала [39, 40]. Такие модели интересны и для создания оборудования для переработки термочувствительных полимеров, где покрытия каналов оборудования, технологические приемы (например инкапсулирование) и процессинговые добавки обеспечивают скольжение расплава и стабилизацию процесса экструзии. Интересно отметить, что модели учитывающие скольжение на стенке канала, также используют степенной закон, то есть характер зависимости сохраняется, но процесс течения, анализируемые параметры и эпюра скоростей потока расплава, при таком подходе, значительно изменяются.

Течение расплава возле стенки канала влияет на многие эффекты (дробление поверхности экструдата, потение головки “die droop”) которые пока не возможно рассчитать, и разработаны только направления решения подобных проблем [41, 42].

Методы расчета современных процессов переработки пластмасс построены на упрощенных, эмпирических моделях, которые прогнозируют вязкость в очень узком диапазоне скоростей сдвига и построены с ограничениями параметров, которые на практике значительно влияют на производственный процесс. Параметры моделей сложно соотнести с физическими, молекулярными характеристиками полимеров, технологическими режимами их переработки. Поэтому разработка точных и простых моделей течения расплавов учитывающих воздействие на пристенный слой в максимально широком диапазоне скоростей сдвига является актуальной задачей.

1.9.1 Проблемы моделирования многослойного течения.

Согласно существующих подходов по расчету многослойных потоков на границе двух несмешивающихся жидкостей должны удовлетворяться следующие условия: непрерывность как тангенциальных так и нормальных составляющих скорости (это подразумевает отсутствие проскальзывания на границе раздела); непрерывность касательных напряжений; баланс разности нормальных напряжений на поверхности с поверхностными силами. Граничным условием является также равенство нулю скорости течения на стенках канала [43].

Современные гравиметрические системы обеспечивают заданное процентное соотношение слоев путем поддержания производительности каждого экструдера на требуемом уровне. Причем устанавливается пропорциональная связь между заданной толщиной слоя и объемной производительностью соответствующего экструдера независимо от положения слоя в канале головки и/или конструкции головки. Такой подход с одной стороны противоречит общепринятому теоретическому описанию многослойного течения, с другой дает высокую точность при управлении толщиной каждого слоя. Например для трехслойного материала LDPE/LDPE/LDPE состоящего из одинаковых монослоев при соотношении слоев 33,3/33,3/33,3 теоретическая эпюра скоростей (рис. 1.7) удовлетворяющая условиям многослойного течения показывает, что производительность экструдера среднего слоя должна быть ≈ в 2 раза выше чем производительность экструдеров внешнего и внутреннего слоев. На самом деле для обеспечения одинаковых толщин трех слоев скорости экструдеров должны быть одинаковы или почти одинаковы.

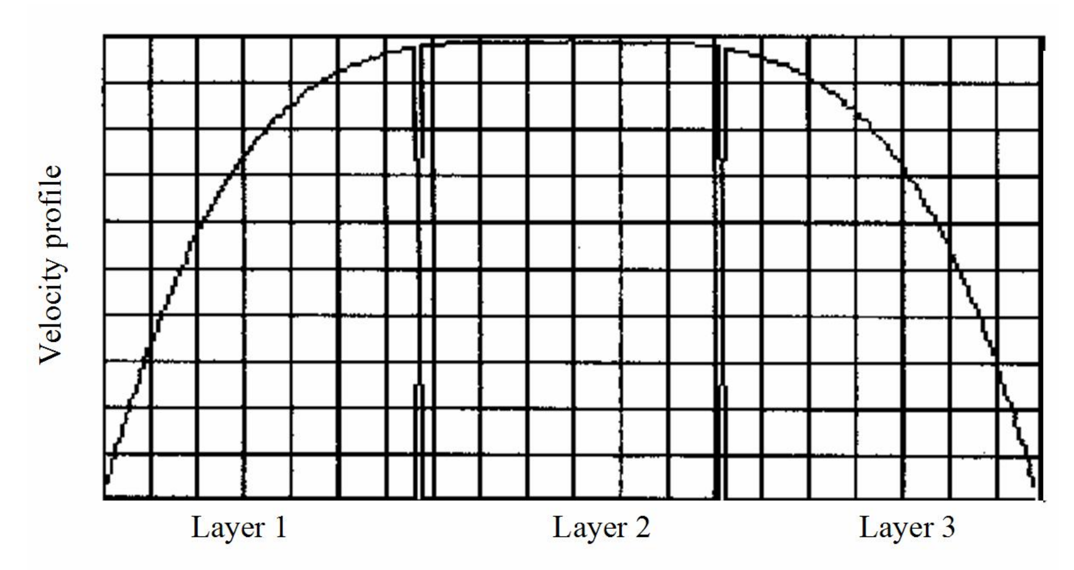


Рис. 1.7. Теоретическая эпюра скоростей многослойного потока рассчитанная на основе степенного закона

При соэкструзии толщины слоев прямо пропорциональны производительности соответствующих экструдеров. При этом варьирование вязкости, количества наполнителя, индекса течения не оказывает заметного влияния на распределение слоев. Такие опытные данные противоречат теоретическим результатам моделирования многослойного течения который основаны на расчетах и моделях сдвигового течения.

1.9.2 Проблемы моделирования движения расплава в шнеке экструдера.

В настоящее время моделирование процесса течения расплава полимера в зоне дозирования шнека экструдера требует доработок и уточнений.

Совершенствование конструкции одношнекового экструдера идет в направлении модификации геометрии шнека и цилиндра, повышения чистоты и твердости их поверхности. Разработаны и повсеместно применяются биметаллические пары шнек-цилиндр, причем марки покрытия адаптируются под задачи повышения абразивной или коррозионной стойкости, подобраны различные сочетания покрытий шнека и цилиндра для оптимальной работы экструдера [44].

Значительное повышение производительности одношнекового экструдера достигнута за счет применения барьерного шнека в сочетании с продольными

канавками вдоль всего цилиндра. Такой экструдер получил название Helibar extruder и рассматривается как одно из эффективных средств ресурсосбережения при переработке пластмасс [45]. Причем ресурсосбережение связано со снижением энергозатрат и потерь сырья так как промывка экструдера значительно ускоряется.

Эти практические результаты во многом не стыкуются с современным теоретическим представлением работы зоны дозирования как насоса для перекачки жидкости.

Очень часто теория в процессах переработки пластмасс отстает от практики, возможно одна из причин в том, что расплав рассматривается как жидкость, а реальное движение ближе к скольжению твердого тела по поверхности.

1.10 Способы прогнозирования свойств для управления качеством пленки.

Комплекс качественных характеристик пленочных материалов и разработка способов их прогнозирования в условиях единичного производства становится одним из ключевых методов технологического процесса. Причем зачастую мастерство и опыт оператора в процессах соэкструзии не помогает ускорению наладки оборудования, поскольку взаимосвязь технологических параметров процесса и качественных характеристик многогранна и неоднозначна.

Качественные характеристики изделия являются показателем окончания переналадки, того что операции №3, 4, 5 (табл. 1.4) выполнены, то есть стабилизировано вторичное формование и линия выведена на стандартную производительность и выпускает качественную продукцию.

Контроль качественных характеристик пленочных полимерных материалов проводится от 30 минут до 5 часов. Это связано с количеством контролируемых параметров и временем проведения испытаний. Например, только кондиционирование образцов пленки перед измерением физико-

механических свойств должно составлять не менее 2 часов. Время контроля сопоставимо с временем переналадки линии, поэтому технология должна обеспечивать 100% гарантию получения качественного продукта без последующей подналадки.

В патенте КПИ [46] предлагается способ прогнозирования свойств эпоксидной композиции которая получена с применением ультразвуковой модификации. Решается задача повышения эффективности, упрощения процесса прогнозирования и повышения достоверности получаемых результатов при определении эффективного соотношения параметров ультразвуковой (УЗ) обработки, что позволит направленное осуществление и прогнозирование параметров эпоксидной композиции. Предлагается способ прогнозирования свойств, где определяются эффективные значения исследуемых переменных параметров ультразвуковой обработки (вход), в качестве которых выбирают частоту, амплитуду, интенсивность ультразвуковых колебаний, а также температуру, время и осуществляют прогнозирования качественных свойств (выход) с помощью математической модели первого порядка (линейного уравнения регрессии) для каждой переменной, которая имеет такой вид:

$$Yi\ (X) = c0 + c1{*}X1 + c2{*}X2 + c3{*}X3 + c4{*}X4 + c5{*}X5,$$

где

Xi - входные параметры ультразвуковой обработки.

Yi- выходные параметры, технологические и эксплуатационные свойства эпоксидной композиции.

c0, c1, c2, ..., c5 - константы уравнения (1), подлежащие определению.

Анализ литературных источников по данной проблеме показывает отсутствие надежных методов и моделей, приводимое выше исследование это начало работ в этом направлении.

При описании технологии, зачастую ограничиваются тенденциями или анализом взаимосвязи одного или двух технологических параметров на характеристики. Например для процесса ориентации, повышение

коэффициента растяжения усиливает ориентацию и соответственно повышает жесткость пленки в направлении ориентации, но всего комплекса технологических параметров и методов контроля не приводится.

В то же время развитие процессов вторичного формования также стремительно, как и появление новых полимерных материалов для переработки в процессах экструзии.

Например фирмой Macro (Канада) [47] предлагается несколько схем вторичного формования для одного и того же комплекта оборудования (рис. 1.10). Выбор способа вторичного формования определяется тем какой полимер выбран в качестве основного барьера по газам - PA terpolymer, EVOH, PA или PVdC, также дополнительно возможно установить модуль электронно-лучевой обработки.

В то же время именно технология вторичного формования дает около 50% всего разнообразия номенклатур. Причем если номенклатура создается путем варьирования сырья или толщины то есть задается первичным формованием то результат – изменение качественных характеристик достаточно легко контролировать. При варьировании технологических параметров вторичного формования сложно оценить результаты контроля физико-механических и усадочных свойств, когда требуемые свойства не достигнуты и требуется дополнительная регулировка технологических режимов.

Поэтому актуальной является задача разработки методов и моделей позволяющих комплексно прогнозировать характеристики и оперативно управлять процессом. Такие методы особенно важны при единичном производстве, например при нескольких переходах в течении смены, когда необходимо точно и быстро настроить линию и оперативно настроить если есть отклонения в процессе.

Процесс	Two-bubble	Three-bubble	Three-bubble
Технические характеристики			
Количество слоев	5, 7, 9 or 11	5, 7, 9 or 11	5, 7, 9 or 11
Материалы	PE, EVOH, EVA, PVdC, Surlyn	PE, EVOH, EVA, PVdC, PA, Surlyn	PE, PP, PS, PET, EVOH, EVA, PA, Surlyn
Толщина пленки	30-90 μm	30-90 μm	30-90 μm
Ширина рукава	200 – 600 mm	200 – 900 mm	200 – 900 mm
Производительность	40 – 120 kg/h	40 – 200 kg/h	40 – 200 kg/h
Скорость намотки	75 m/min	105 m/min	150 m/min
Метод ориентации	Water Heated	Water Heated	Infrared Heaters
Метод термофиксации	Heated Rollers	Infrared Heaters	Infrared Heaters

Рис. 1.8. Способы вторичного формования в процессах соэкструзии, основные характеристики процесса

1.11 Характеристики типовой исследуемой соэкструзионной установки по производству рукавной пленки.

1.11.1 Технологическая схема производства.

Технологический процесс получения многослойных полимерных материалов методом соэкструзии состоит из следующих стадий:

- получение расплавов полимеров;
- формование многослойного рукава и стабилизация диаметра;
- охлаждение рукавного многослойного полимерного материала с помощью охлаждающих устройств или плоского многослойного полимерного материала на валках;
- отбор, приемка, резка и намотка многослойного полимерного материала.

В данном технологическом процессе транспортировка сырья осуществляется вакуумной установкой.

Для приготовления композиции внешнего А и внутреннего Е слоя многослойной пленки проводится процесс смешения компонентов (РА6, РА6/66, антиблокирующая добавка) в станции подготовки рецепта. Станция представляет собой приемные бункера для загрузки каждого компонента, блок гравиметрического дозирования, бункер для смешивания и накопительный бункер для загрузки в систему транспортирования.

Готовая смесь подается в бункер 1, который оснащен системой взвешивания. Измеряя текущий расход сырья, система управления контролирует производительность экструдера 2. При отклонении расхода от заданного, изменяется скорость вращения шнека для обеспечения заданной производительности. Относительная погрешность дозирования расплава по каждому слою составляет не более ±1,5% .

Основным оборудованием для получения многослойных пленок методом соэкструзии являются одночервячные экструдеры 2. Из загрузочного бункера 1

гранулированный материал поступает через загрузочную воронку в канал червяка.

Гранулы материала, продвигающиеся вдоль канала червяка, расплавляются. Расплав продавливается через решетку, за которой в устанавливается пакет сеток. Затем расплав проходит в головку 3, где происходит формование расплава.

Головку 3 условно можно разделить на четыре блока, в первом происходит подключение экструдеров и формирование потоков расплавов от каждого экструдера, во втором блоке потоки разделяются для подачи их в спиральные распределители расплава. Третий блок это спиралеобразные распределители расплава где отдельно формируется каждый слой, и четвертый это блок совместного течения слоев и формирования трубчатой многослойной заготовки. Совмещение слоев при соэкструзии происходит в формующем канале головки, перед формующей щелью, при котором течение расплавов осуществляется по отдельным распределительным каналам и потоки их соединяются в формующей щели при параллельном ламинарном течении.

Для охлаждения рукава используется водно-масляная система охлаждения. Внутрь рукава подается вазелиновое масло, снаружи рукав охлаждается водой. Регулируя уровень масла и воды, обеспечивают требуемый диаметр первичного рукава (блок 4).

Первая тянущая пара 6 установлена в ванне с холодной водой 5. Ее скорость вращения автоматически устанавливается гравиметрической системой управления таким образом чтобы обеспечить требуемую толщину первичного рукава при сохранении заданной производительности экструдеров.

После резкого охлаждения рукав материал приобретает требуемую аморфную структуру, складывается и через систему направляющих валков 7 подается на узел ИК-разогрева 8, после чего в высоко-эластичном состоянии раздувается на узле 9, одновременно рукав растягивается в продольном направлении с помощью тянущих валков, тем самым обеспечивается двуосная ориентация пленки.

Далее через систему направляющих валков 7 рукав подается на четвертую тянущую пару 10, где с помощью нагревателей 11 происходит его разогрев до температуры максимальной скорости кристаллизации. В узле 12 стабилизируются диаметр, и усадочные свойства, а также немного снижается разнотолщинность пленки.

Сложенное полотно при помощи направляющих валков 7, валками отводится к намоточному устройству 13. Для уменьшения усилий намотки перед намоточным устройством устанавливают регулятор натяжения.

После намотки бобины укладываются на поддоны и транспортируются на дальнейший передел.

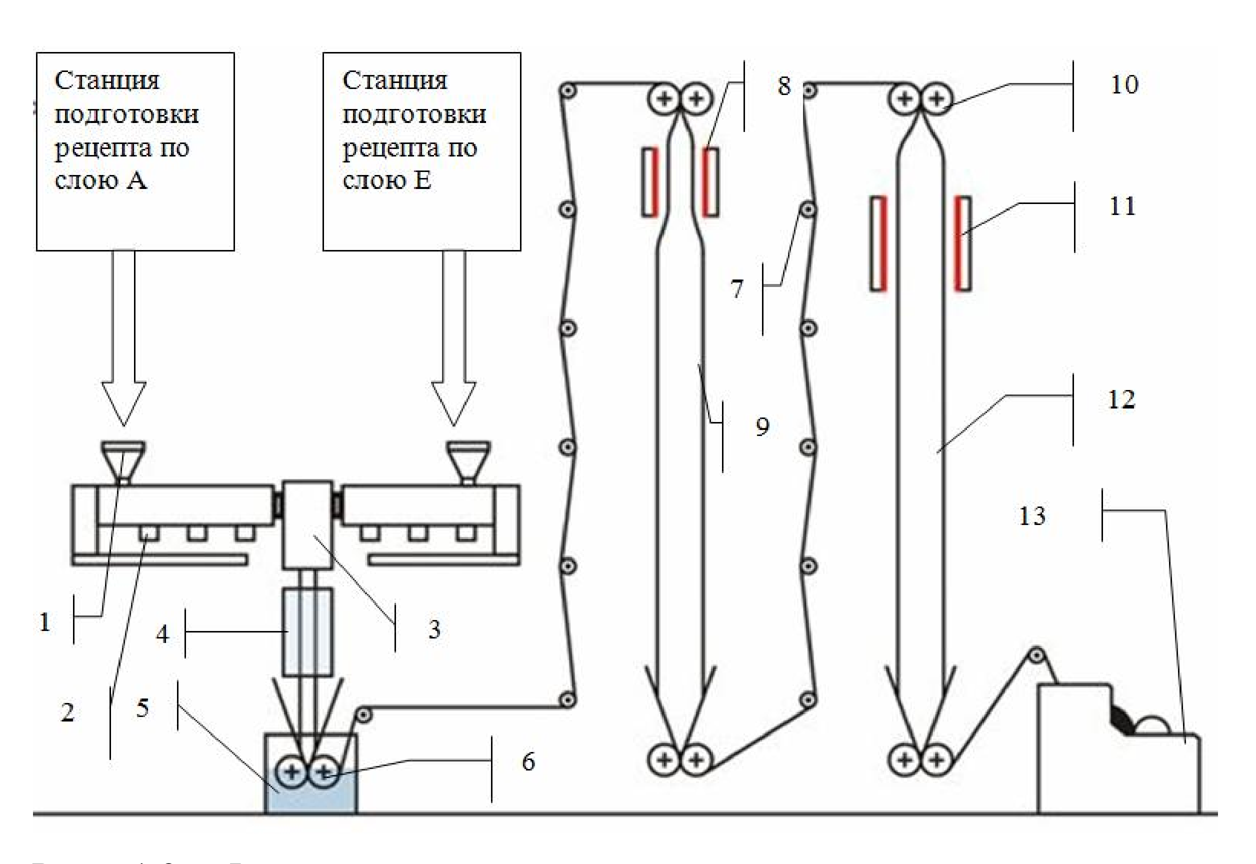


Рис. 1.9. Функциональная схема исследуемого типового процесса изготовления многослойной термоусадочной пленки методом соэкструзии

1-загрузочный бункер гравиметрического дозирования, 2-экструдер, 3-соэкструзионная головка, 4-блок формирования размеров первичного рукава, 5-ванна охлаждения, 6-первая тянущая пара валков, 7-направляющие валки, 8-узел разогрева первичного рукава, 9-узел раздува рукава и формирования

пленки, 10-четвертая тянущая пара валков, 11-узел термообработки пленки , 12-узел второго раздува для термофиксации пленки, 13-намоточное устройство.

1.11.2 Технические характеристики.

Изделие: соэкструзионная рукавная пятислойная термоусадочная барьерная пленка.

Структура пленки: A/B/C/D/E, ширина рукава: 60-300мм, диаметр рулона max 410мм, толщина пленки 25-60 мкм, разнотолщинность ±7% (для диапазона ±3σ) и если 7% больше 5 мкм то отклонение не более ±5мкм.

Производительность: max 80 кг/час, max скорость 200м/мин.

Таблица 1.8

Конфигурация экструдеров по слоям

Экструдер	A наружный	B	C	D	E внутренний
Диаметр шнека, мм	45	25	45	25	30
Отношение L/D	30:1	30:1	30:1	30:1	30:1
Обороты шнека, максимум, RPM	160	150	160	150	160
Производительность, максимум, кг/ч	30	5	30	5	15
Конфигурация полимеров по слоям	PA6	Tie Resins	LDPE	Tie Resins	PA6
	PA6/66	LDPE	LLDPE	Plastomers	PA6/66
	LDPE	LLDPE	HDPE	LDPE	LDPE
	LLDPE	HDPE	PP	LLDPE	LLDPE
	HDPE	EVOH	PA6	HDPE	HDPE
	PP		PA6/66	Blends	PP
	Blends		mLLDPE		Blends

1.11.3 Номенклатура выпускаемой продукции.

Рассмотрим каким образом сформирована номенклатура пятислойной полиамидной термоусадочной рукавной пленки для упаковки колбасных изделий. Какие свойства обеспечиваются, и каким образом эти свойства достигаются.

Базовая пленка PA/Tie/PE/Tie/PA имеет следующие основные характеристики:

Внешний полиамидный слой обеспечивает высокую механическую прочность, низкую проницаемость по кислороду и других газов, имеет высокий глянец и способность к нанесению печати, а также препятствует развитию микрофлоры внутри батона.

Средний слой, состоящий из полиолефинов, придает низкую паропроницаемость и высокую эластичность, снижает потерю массы продукта при хранении (высыхание).

Адгезионные слои, состоящие из сополимеров этилена, обеспечивают работу многослойного материала как единого целого.

Внутренний полиамидный слой, контактирующий с продуктом, биологически нейтрален, имеет высокую стойкость к пищевым кислотам и жирам, обеспечивает оптимальную адгезию оболочки к мясному продукту.

Таблица 1.9

Формирование номенклатуры базовой оболочки

Качественный параметр	Каким образом достигается	Количество типоразмеров
Цвет	Окрашивание одного, или двух слоев путем добавления суперконцентрата красителя от 1 до 20% в рецепте слоя	50
Диаметр	Изменение размеров рукава в процессе вторичного формования	от 30 до 200 с шагом 1мм, итого 170
Толщина	Изменение толщины трубчатой заготовки при постоянных коэффициентах растяжения	35мкм, 40мкм, 50мкм, итого 3

Всего 50*170*3=25500 типоразмеров пленки базовой номенклатуры, за счет различных цветов и диаметров рукава, а также толщины.

Получение новых видов достигается:

- применением добавок (минеральные наполнители, вспениватели) которые принципиально меняют внешний вид, органолептические свойства, шероховатость и структуру поверхности;
- модификацией физико-механических показателей, которые влияют на форму колбасного изделия, съем пленки с изделия (перед нарезкой и вакуумной упаковкой), обеспечивают возможность варки в металлических формах и изгиба оболочки для придания кольцевой формы;
- применением добавок которые меняют проницаемость пленки для различных применений (УФ барьер, проницаемость для коптильного дыма);
- применением добавок которые модифицируют свойства поверхности внешнего или внутреннего слоя для улучшения адгезии со специальными видами краски или изменения адгезии с различными видами фарша.

Далее типоразмеры для нового вида разрабатываются по технологии базовой номенклатуры путем добавления различных красителей, варьирования диаметров и толщины (табл. 1.10).

Таблица 1.10

Способ разработки нового вида пленки

№ вида	Качественный параметр	Каким образом достигается	Цвет, ед.	Диаметр, ед.	Толщина, ед.	Всего типоразмеров
1	2	3	4	5	6	7
1	Внешний вид, органолептические показатели,	Добавка №1 во внешний слой	10	100	1	1000
2	Шероховатость, структура поверхности	Добавка №2 во внешний слой	10	100	1	1000
3	Поверхностная активность и совместимость слоя	Добавка №3 во внешний слой	10	50	1	1000

Продолжение таблицы 1.10

1	2	3	4	5	6	7
4	Повышение барьера к УФ излучению	Добавка №3 в средний слой	10	100	2	2000
5	Формирование колбасного батона в виде шара, эллипсоида	Изменение технологических режимов.	20	50	2	2000
6	Оболочка снимается при нарезке по спирали	Изменение технологических режимов.	20	100	3	3000
7	Внешний вид, органолептические показатели	Добавка №4 во внутренний слой	10	100	1	1000
-	-	-	-	-	ИТОГО	11000

Следует отметить, что итоговое количество номенклатур 36500 ед. не отражает всех возможностей оборудования и может быть расширено. Например, для снижения стоимости нанесения УФ печати на оболочку, используются радикальные УФ краски. Такие краски имеют гораздо выше адгезию к PE чем к PA, для решения задачи, в оболочке меняем местами средний и внешний слой, в итоге получаем новый вид со структурой PE/Tie/PA/Tie/PA, который в свой очередь имеет особенности технологии так как внешний полиэтиленовый слой имеет свои характеристики скольжения по тянущим валкам линии и печатного оборудования, а также особенности применения на мясокомбинате.

С другой стороны существует 80-150 ходовых номенклатур, которые занимают 80-90% всего ежемесячного объема выпуска продукции, но предприятие обеспечивает возможность выпуска всего ассортимента, поскольку даже один небольшой заказ может повлиять на клиента и убедить его в дальнейшем размещать более крупные заказы. Собственно это зависит от политики проводимой предприятием по отношению к клиентам и сильно зависит от того, что предлагают конкуренты.

Для исследуемой установки, на основе практических наблюдений были получены значения времени по каждому виду затрат в процессе технологического перехода на новую номенклатуру (табл. 1.11).

Таблица 1.11

Диапазон варьирования времени в процессе технологических переналадок

№ операции	Описание	Tmin, мин	Tmax, мин	Процесс	Узел, модуль оборудования
1	Замена рецепта в подающих бункерах (станции подготовки рецепта)	20	30	Подготовка рецепта, смешивание	Станция дозирования
2	Промывка расплава в соэкструзионной головке и экструдере	10	90	Формование расплава под давлением	Экструдер, головка
3	Термостабилизация экструдера после изменения заданной температуры (при необходимости)	10	30	Формование расплава под давлением	Экструдер, головка
4	Выход экструдера на стабильную производительность	10	30	Вторичное формование (калибровка, ориентация, термофиксация, намотка)	Блок формирования первичного рукава …. намотчик
5	Стабилизация процессов вторичного формования	5	30	Вторичное формование (калибровка, ориентация, термофиксация, намотка)	Блок формирования первичного рукава …. намотчик

Таким образом подтверждается что наиболее сложно прогнозировать операцию №2, также промывка экструдера и головки может быть максимально длительной по времени.

1.12 Выводы по первому разделу.

1. Производство гибких многослойных упаковочных материалов методом соэкструзии является мелкосерийным, в некоторых случаях единичным, поэтому требуется разработка методов управления технологическим процессом в условиях постоянных переналадок (переходов) целью улучшения трех основных показателей производства – производительность, себестоимость и качество.
2. Существует явное противоречие между разработанными практическими методами ускорения переходов и промывок, которые направлены, прежде всего, на интенсификацию течения возле стенки канала и теоретическим описанием процесса течения расплава полимера, где течение возле стенки принимается равным нулю, и используются эмпирические модели, не объясняющие наблюдаемых эффектов при течении расплавов полимеров.
3. Требуются разработка экспресс методов контроля и анализа технологического процесса соэкструзии и правила выработки управляющих воздействий, разработка методов и моделей прогнозирования качественных характеристик пленочных материалов в зависимости от технологических режимов вторичного формования для снижения времени стабилизации процесса после проведения переналадки.

Раздел 2. Разработка технологий смешивания, экструзии и регулирование качества продукции

2.1 Исследование и разработка подготовительных процессов

Каждый слой разрабатывается с учетом его функционального назначения и обычно состоит из нескольких материалов. Подготовка смеси для каждого слоя может проводиться двумя способами:

1. В упрощенном подходе подготовка и смешивание всех компонентов (перед подачей их в гравиметрический бункер экструдера) производится в смесителе типа «пьяная бочка», куда проводится засыпка вручную каждого компонента.

2. Используется автоматическая станция для загрузки, дозирования (взвешивания), смешения и подачи в экструдер каждого компонента, применяемого в рецепте слоя.

Усложнение и удорожание системы управления и обслуживания линии очевидно (рис 2.1.). Причем возникает ряд вопросов о целесообразности автоматической подготовки рецепта каждого слоя.

1. Насколько улучшаться характеристики продукта?
2. Насколько повысится стабильность производства?
3. Каким образом, на стадии проектирования технологического процесса, определить необходимое количество автоматически дозируемых компонентов для каждого слоя?
4. Где искать экономический эффект от внедрения системы подготовки рецепта?
5. Каким образом это отразится на гибкости производственной системы?

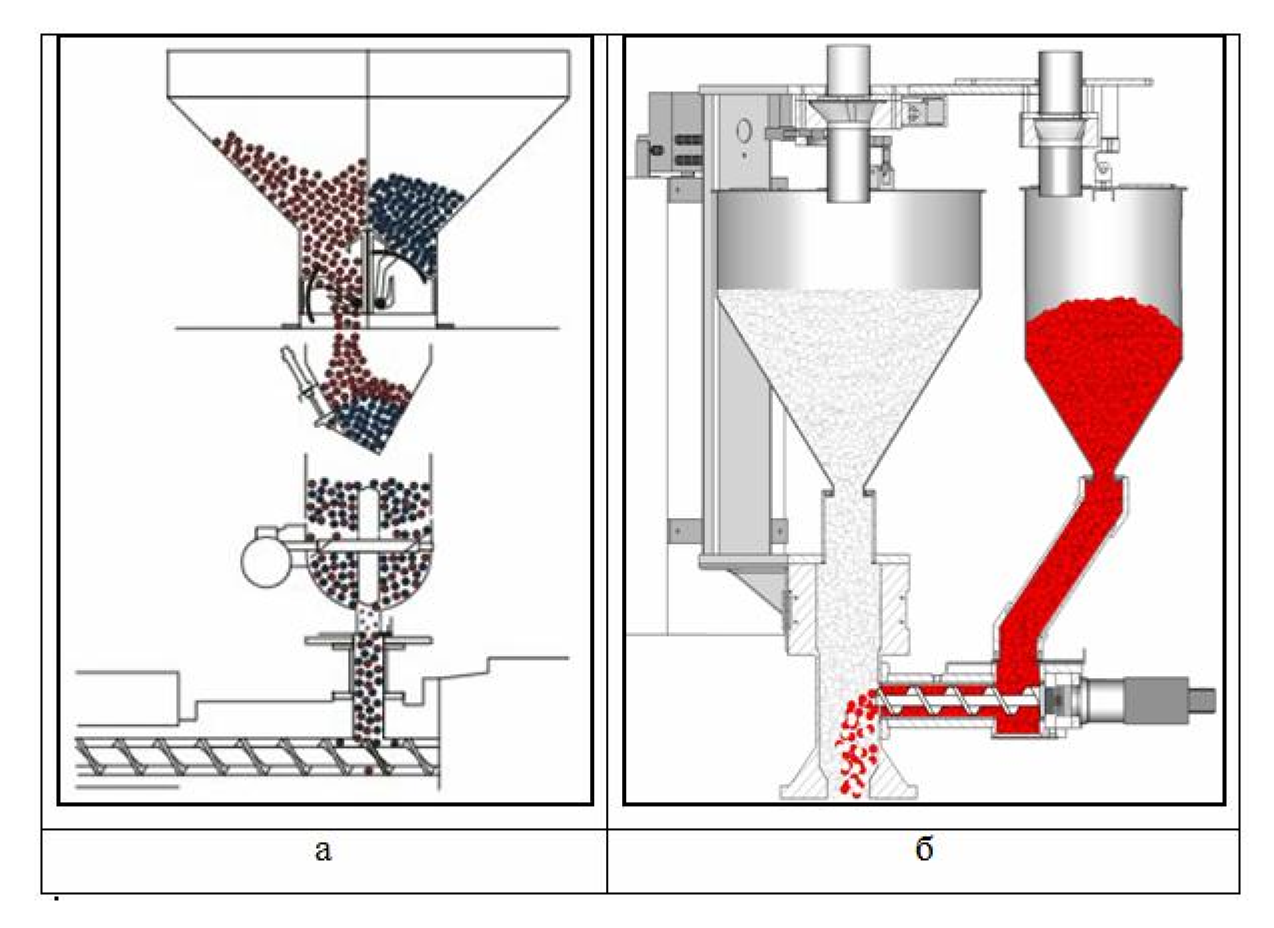


Рис. 2.1. Варианты схем компоновки станций автоматической подготовки рецепта, а - гравиметрический принцип подготовки рецепта (используется весовой и смесительный бункер), б - гравиметрическое дозирование путем непрерывного контроля потери веса

На стадии проектирования прежде всего нужно определить какие слои будут окрашиваться и именно для них обязательно предусмотреть автоматическое дозирование красителя. Этим решается ряд вопросов связанных с изготовлением окрашенных пленок. Прежде всего решается задача оперативного управления оттенками пленки, если отклонения возникают из-за нестабильности цвета суперконцентрата красителя.

При переходах по цвету, при изготовлении минимальных объемов пленки с так называемым «эксклюзивным» цветом сложно точно спрогнозировать и рассчитать сколько окрашенной смеси готовить для изготовления небольшой партии продукции, особенно когда масса продукции сопоставима с объемом смесительного бункера или с объемом каналов экструдера и головки, обычно это приводит или к остаткам окрашенного сырья, или к недовыполнению

требуемого объема партии продукции. Использование дозатора решает эту задачу, упрощая управление замесами, минимизирует массу остатков окрашенных смесей.

Если рассмотреть какой дозатор - с одним весовым бункером или с непрерывным контролем веса каждого компонента, использовать для подачи красителя, то здесь явно выигрывает принцип непрерывного контроля веса так как результат достигается при более простой (компактной) конструкции и подача красителя максимально приближена к зоне загрузки экструдера, что позволят более оперативно управлять цветом. Также к недостаткам конструкции рис. 2.1 - а, следует отнести влияние грануломерического состава на качество смешивания, поэтому существует необходимость варьировать время смешивания и объем дозы при изменении гранулометрического состава вводимых компонентов, например при изменении плотности суперконцентрата красителя.

Следующая задача решаемая применением автоматических станций подготовки замесов - это введение в рецепт так называемых ключевых компонентов, то есть компонентов с объемом дозирования от 0,5% до 3%.

В технологии переработки пластмасс практика значительно опережает теорию. Ежегодно появляются новые полимеры, компаунды. Причем их применение зачастую бывает нестандартным, то есть не таким каким его представлял себе разработчик. Постоянный поиск технологических решений направленный на модификацию различных физико-механических, химических, барьерных свойств полимерных пленок и упаковок путем введения различных добавок, приводит к совершенно неожиданным результатам, например совмещению полимеров в однослойной пленке, которые не адгезируют между собой в монослоях многослойной пленки.

Поэтому введение ключевых добавок в действующий рецепт, а также высокая гибкость технологии подготовки рецепта при гарантированной стабильности его воспроизведения дает значительные преимущества в разработках и модификации свойств пленочных материалов.

Использование автоматизированной системы управления процессом подготовки состава композиции для каждого слоя многослойного полимерного изделия обеспечивает минимальное влияние человеческого фактора на точность составления рабочей композиции. Это повышает эффективность контроля технологического процесса в целом, улучшает характеристики пленки и стабильности процесса. Дополнительно могут решаться задачи учета и контроля расхода сырья.

Исходя из практических наблюдений – внедрение станции автоматической подготовки рецепта может снизить отходы в 1,5раза.

Вообще часто возникает соблазн списать на ошибки оператора приготовления замеса многие организационные и технологические проблемы, связанные с качеством продукции и отходами производства. Устранение такого фактора само по себе огромный шаг в вопросах совершенствования технологии.

2.1.1 Исследование влияние отклонений в работе смесительного оборудования на качество продукции

Для исследований подготовительных процессов изготовления и смешивания композиции, выбраны два периода в работе смесительного оборудования (производительность дозатора max 250кг/час, дозирование смешивание 6-ти компонентов). Первый период это стабильная работа станции, то есть не было систематических сбоев и замечаний со стороны операторов линии. И второй период когда неполадки и сбои в системе дозирования появлялись ежедневно. Основной причиной вызывавшей возникновение периодических неполадок в станции смешивания, это сбои в системе сжатого воздуха, нестабильность (колебания) давления сжатого воздуха 5-7атм, с периодичностью 3-6часов. Нестабильность давления сжатого воздуха приводила к аварийным сигналам от системы диагностики станции смешивания, но на процессе экструзии явно не отражалась, пленка производилась без остановок и соответствующего качества. Необходимо отметить, что основные узлы соэкструзионного оборудования не требуют

высокого давления (7-8атм) в системе сжатого воздуха, в то же время дозирующие элементы станции требовали стабильный и высокий уровень давления воздуха, и это было отражено в руководстве по эксплуатации станции дозирования.

Особенность станции подготовки рецепта в том, что дозирование проводится путем управления скоростью открытия заслонки с помощью пневмоцилиндра, время срабатывания заслонки менее 1сек, поэтому высокое давление сжатого воздуха стабилизирует процесс дозирования. Станция оснащена датчиком давления воздуха, который настроен на порог 5атм.

Для оценки стабильности смешивания применялась следующая методика: отбиралось 2 параллельные пробы из загрузочного бункера экструдера объемом 8л (≈7кг сырья) (где находилась приготовленная композиция). Пробоотборник в виде металлического стакана с ручкой длиной около 0,5м. Суммарный вес пробы $П_{\Sigma}$ от 24гр до 28гр, затем проба разбиралась по компонентам по каждой грануле и рассчитывался процентный состав пробы.

Во многих источниках [48-52] нет анализа смешения многокомпонентной системы, или все сводится к оценке распределения ключевого компонента. Предложение, изложенное в [53], определять стабильность смешивания по равномерности распределений одного-, **двух** ключевых компонентов, также не позволяет комплексно анализировать процесс, так как:

- ключевых компонентов (заданный процент от 1% до 10%) может быть три и более;
- каждый компонент может иметь различные свойства влияющие на стабильность его дозирования, равномерность распределения, электризуемость, гранулометрические показатели и т.д.;
- отклонения могут возникать из-за неполадок в оборудовании дозатора одного из ключевых компонентов, а остальные дозаторы работать стабильно;
- и наконец наверное самое главное, то что технологу необходимо видеть накопленную ошибку дозирования, так как это позволят

более глубоко анализировать процесс, провести параллели с другими параметрами процесса и качественными характеристиками.

Хотя следует отметить, дальнейшие исследования показали, что для экспресс оценки, методика, основанная на анализе одного компонента, применима в качестве экспресс метода.

Для разработки комплексной методики контроля многокомпонентной системы, отклонение в каждой пробе от заданного процентного соотношения, рассчитывалось с учетом отклонений всех используемых компонентов, то есть как суммарное отклонение, по формуле:

$$\Delta_j = \sum \left| X_{ij\ эк} - X_{ij\ зад} \right|$$

где

$X_{ij\ эк}$ - измеренный процент i-го компонента в j-й пробе,

$X_{ij\ зад}$ - заданный процент i-го компонента в j-й пробе.

i – номер компонента в пробе.

j – номер пробы

Параметр Δ_j может служить критерием качества смешения при некотором постоянном значении размеров пробы $П_\Sigma$.

Размер пробы $П_\Sigma$ зависит от ряда разнородных технологических факторов: максимальное время анализа пробы, объем экструдера, смесительная способность экструдера, гранулометрический состав сырья. В данном исследовании (при выборе пробы не более 30гр) учитывались следующие исходные данные: объем экструдера 700см^3 , объем зоны дозирования 135см^3, отношение коэффициента обратного потока к коэффициенту прямого потока ~0,15, время анализа пробы не более 60 мин.

Погрешность смешения, в зависимости от конфигурации дозирующего оборудования, складывается из следующих составляющих:

$$\Delta_j = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4$$

где

Δ_1 = погрешность весов, или погрешность формирования весовой дозы;

Δ_2 = погрешность из-за различного гранулометрического состава компонентов, особенно уровня электризуемости и веса гранул, что приводит к различной скорости транспортирования;

Δ_3 = погрешность смешивания в самом смесительном устройстве, недостатки конструкции, ошибки технологии;

Δ_4 = погрешность вызванная сочетанием трех факторов: размер пробы, масса одной гранулы, массовая доля компонента, то есть когда масса одной гранулы сопоставима с массой компонента в пробе.

Результаты исследования качества смешения для различных настроек дозатора показаны на рис. 2.2. В качестве эталона принималось смешение в бочке, когда погрешность смешения практически постоянна и вызвана только одной составляющей Δ_4. В результате регулировки технологических параметров

Таблица 2.1

Результаты исследования качества смешения

№ опыта	Описание процесса	Количество проб	Среднее значение суммарной погрешности дозирования Δср	Среднеквадратичное отклонение
Ряд №1	до регулировки дозатора	43	6,8	2,3
Ряд №2	после регулировки дозатора	35	4,08	1,43
Ряд №3	эталон	10	3,34	1,12

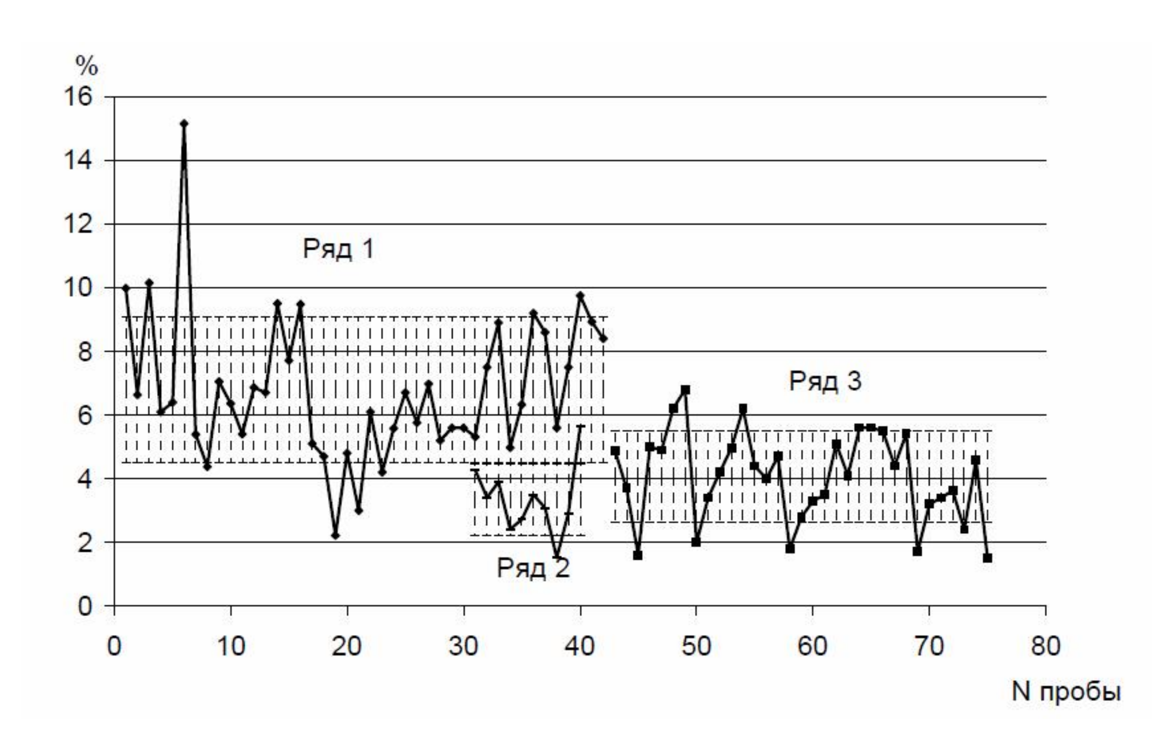


Рис. 2.2. Изменение суммарного процента отклонения в пробе при различных условиях работы дозатора (ряд 1 и ряд 3) и изменении способа смешивания ряд 2

Для поиска закономерностей процесса проводился анализ абсолютной и относительной погрешности определения каждого компонента в пробе:

$\Delta_{ij} = \left| X_{ij\ эк} - X_{ij\ зад} \right|$

$\varepsilon_{ij} = \Delta_{ij} / X_{ij\ зад} *100$

В процессе исследования было определено, что погрешность смешения взаимосвязана с процентным содержанием компонента. Чем выше процент компонента тем выше может быть абсолютная погрешность дозирования, но в то же время должна быть ниже относительная погрешность смешения. На рис 2.3 показана данная закономерность.

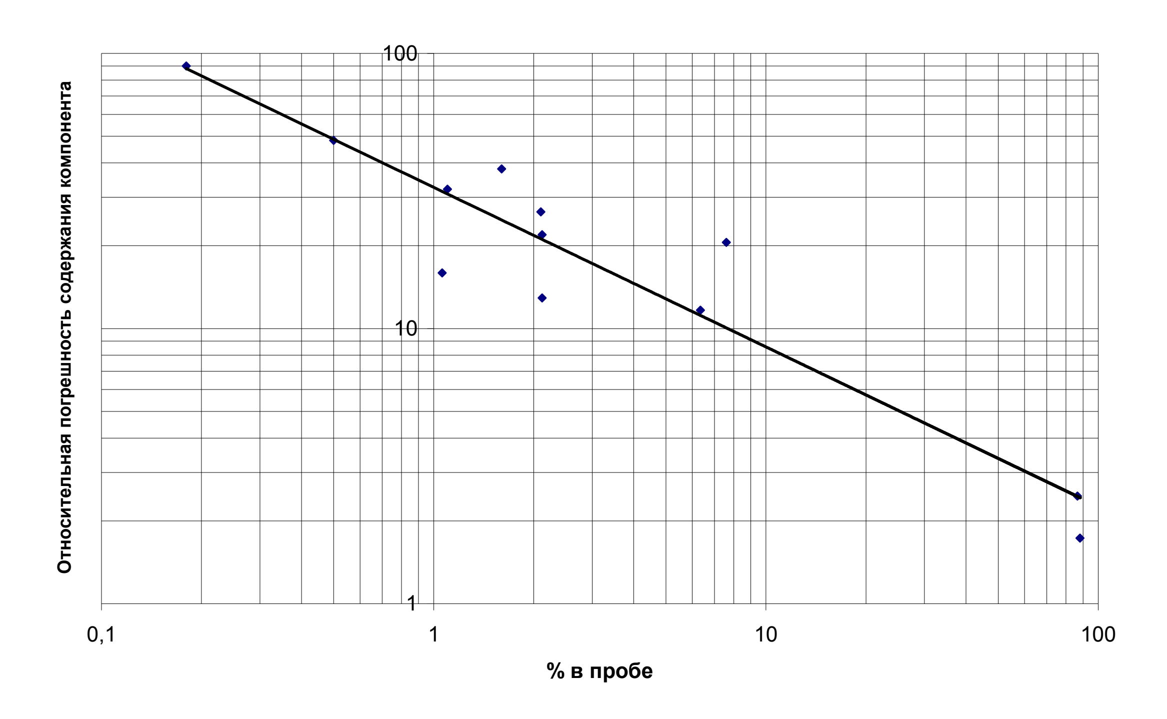


Рис. 2.3. Зависимость относительная погрешности смешивания от заданного процентного содержания компонента

Таблица 2.2

Взаимосвязь заданного процента компонента в пробе с погрешностью смешения (типичные значения)

Наименование	$X_{ij\ зад}$	Δij	εij
Компонент 1	90	1,7	1,9
Компонент 2	8	1,3	16,3
Компонент 3	1,5	0,5	33,3

Влияние стабильности смешивания на качество продукции оценивали путем анализа физико-механических свойств. Для этого отбирались образцы пленки и проводилось их испытание на разрывной машине Zwick 2,5кН, (размеры образца 70х10мм, толщина 20±2мкм, скорость 100мм/мин). Оценка проводилась по усилию на разрыв и относительному удлинению (средние значения и коэффициент вариации). Отдельно анализировались минимальные значения полученные в ходе испытаний.

Одним из параметров, который показывает стабильность характеристик любого процесса, является коэффициент вариации. В частности для оценки

стабильности относительного удлинения полиамидных мононитей установлен допуск для коэффициента вариации – не более 15% [54].

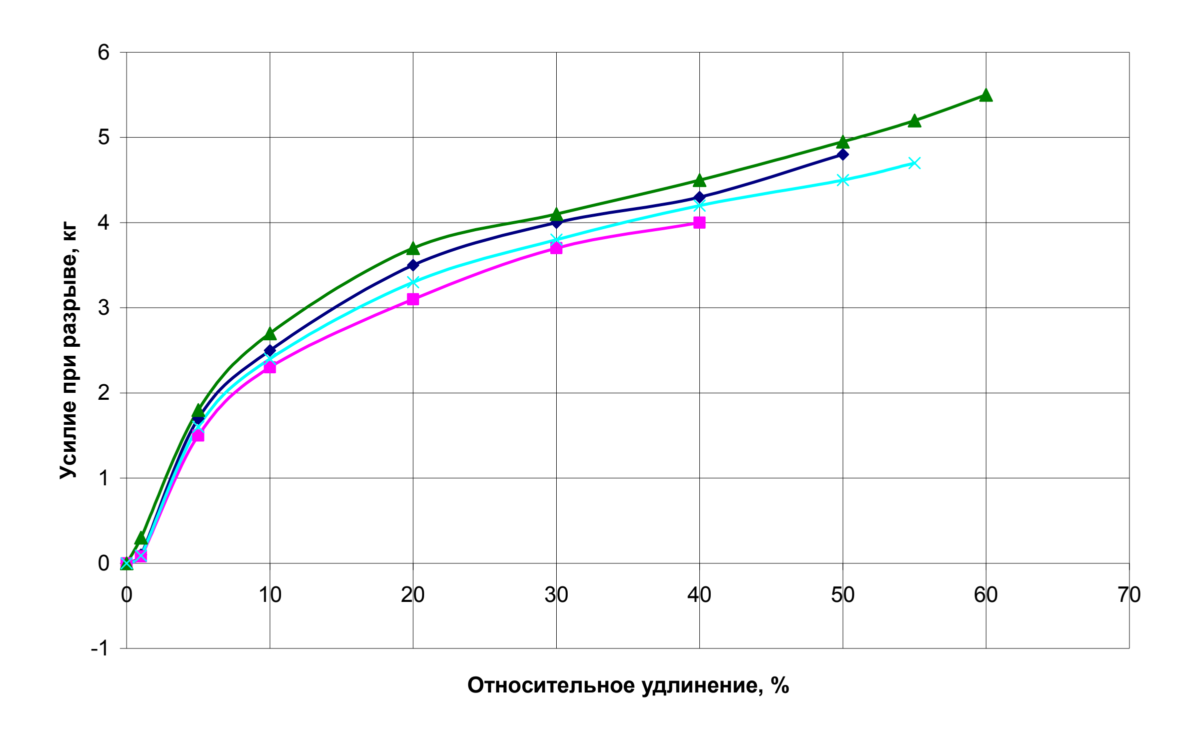


Рис. 2.4. Типичные физико-механические характеристики при испытании пленочного ориентированного полиамидного материала

Таблица 2.3

Пример анализа стабильности физико-механической характеристики.

Параметр	Относительное удлинение, %				Среднее	Среднеквадратичное отклонение	Коэффициент вариации
	X1	X2	X3	X4	Xср	S	S/Xср*100%
Значение	50	40	60	55	51,25	8,5	16,7

Сравнительные результаты представлены в таблице 2.4 и 2.5. Представлены физико-механические характеристики пленочных материалов при различной стабильности дозирования.

Таблица 2.4

Качество продукции при стабильности дозирования ряд №1, рис.2.2, количество испытанных образцов n=299

Параметр	Усилие на разрыв	Удлинение при разрыве
Среднее значение, Хср	4,92кг	37,25%
Среднеквадратичное отклонение, S	0,52кг	6,60%
Коэффициент вариации, S/Хср*100%	10,58%	17,71%
Минимальное значение, Хмин	4,10кг	29,00%

Таблица 2.5

Качество продукции при стабильности дозирования ряд №2, рис.2.2, количество испытанных образцов n=315

Параметр	Усилие на разрыв	Удлинение при разрыве
Среднее значение, Хср	4,83кг	38,29%
Среднеквадратичное отклонение, S	0,44кг	6,13%
Коэффициент вариации, S/Хср*100%	9,15%	16,01%
Минимальное значение, Хмин	4,20кг	29,00%

Для двух вариантов стабильности дозирования получены соответственно коэффициенты вариации относительного удлинения 17,71% и 16,01%. При этом минимальное усилие на разрыв увеличилось с 4,1кг до 4,2кг.

Итак, при снижении суммарного отклонения при смешении с 6,8% до 4,08%, стабильность физико-механических характеристик повышается на 10%. Минимальное усилие на разрыв повышается на 2,3%.

Методика оценки качества смешения по суммарному отклонению компонентов применима для контроля состояния технологии и оборудования. Но требуется длительная привязка к действующему процессу путем анализа различных состояний оборудования, рецептур и эталонных процессов. Также к

недостаткам следует отнести отсутствие универсальности и единых критериев качества смешивания. В эксперимент не попали точки с дозированием 11-89%.

2.1.2 Исследование критериев оценки качества смешивания

Для оценки качества смеси выполнен анализ различных методов и выделены три основных статистических критерия:

1. Среднеквадратичное отклонение содержания компонента в пробах, которые отбираются в процессе эксперимента.

2. Коэффициент неоднородности (вариации).

3. Степень отклонения имеющегося распределения от случайного, точнее индекс смешения.

Эти критерии разработаны по сути для двухкомпонентных систем. Современные рецепты обычно содержат до 10 компонентов, и критерии качества смешения требуют развития. С другой стороны не выявлена четкая взаимосвязь качества смешения при подготовке рецепта и качества готового изделия. Поэтому необходимо разработать критерии оценки качества смешения многокомпонентных систем, методику контроля качества смешения и определить влияние качества смешения на характеристики готового изделия (пленки, упаковки).

Для изучения поставленной задачи выполнены исследования в производственных условиях [55]. Каждые 1-3 смены отбирались две параллельные пробы готовой смеси из бункера экструдера непрерывно работающей линии. Каждая отобранная проба разбиралась на компоненты и определялось процентное соотношение компонентов в пробе. Полученные данные за период наблюдений результаты разбора проб усреднялись и анализировались статистически – рассчитывалось среднее содержание компонента X_{ki} и среднеквадратичное отклонение S_{ki} .

В качестве выходной характеристики анализировались физико-механические характеристики пленки в продольном и поперечном направлении (усилие и относительное удлинение при разрыве, модуль, предел текучести, коэффициент вариации относительного удлинения). Е-модуль рассчитывается

на участке от 0,5% до 1% удлинения. Измерение физико-механических характеристик выполнялись несколько раз в смену, в то же время отбор смеси из бункера выполнялся 1 раз за 1-3 смены. Это связано с системой контроля технологического процесса, временем проведения анализа, системой оценки качества. Результаты анализа представительности пробы приведены в табл. 2.6, количество проведенных испытаний на входе (Кпр) и выходе (Кфм) системы – в табл. 2.7.

Физико-механические характеристики для каждого испытания определялись по 4-м образцам, и рассчитывались коэффициенты вариации для продольного и поперечного относительного удлинения. Затем за период наблюдений результаты усреднялись. В качестве периода наблюдений был выбран 1мес. То есть все результаты наблюдений усреднялись и анализировались после их сбора в течение одного периода. Исследование проводилось в течение 5месяцев (см. П1-П5, табл. 2.7). И далее сравнивались периоды наблюдений между собой. В период наблюдений выпускалась широкая номенклатура пленок по диаметру (20мм-40мм), толщине (16-25мкм), цвету (содержание красителя от 0% до 3%) (более 30 типоразмеров). Бункер экструдера объемом 10л, вмещает 7,0-8,0кг сырья, подготовка рецепта автоматизирована, смесь создавалась в гравиметрическом дозаторе. Вес одной пробы для лабораторного анализа от 0,025 кг до 0,03кг. Экструдер диаметром 45мм, диапазон рабочих частот вращения 80-110об/мин. Противодавление в головке 150–240Бар. В табл. 2.6 приведен пример анализа одной пробы.

Известно, что разброс значений концентраций диспергируемой фазы в «идеальной» смеси подчиняется закону биномиального распределения. Общее число частиц в каждой пробе и их содержание должно удовлетворять соотношению [49]:

$$N > \frac{9}{c(1-c)}, \qquad (2.1)$$

где c - концентрация компонента.

Тогда биномиальное распределение может быть заменено нормальным распределением. Для оценки представительности пробы выполнена проверка на минимально необходимое число гранул в пробе. Масса одной гранулы каждого компонента определялась как среднеарифметическое из десяти гранул. Из таблицы 2.6 видно, что для оценки качества смешение Компонента 1 достаточно отобрать 66 гранул, для оценки Компонента 6 необходимо 1938 гранул. Фактический размер пробы составлял от 2100 до 2500 гранул. Поэтому распределение компонентов в пробе можно считать нормальным. Дополнительно для проверки представительности пробы проведен расчет согласно [51]. Для некомкующихся материалов минимально необходимая масса пробы

$$G_m = \frac{10^4 \cdot d^3 \cdot p}{2.5 \cdot c_0}, \qquad (2.2)$$

где d – диаметр гранулы,

p – плотность материала гранулы,

c_0 – концентрация компонента.

Поскольку система многокомпонентная, то рассчитана средневзвешенная масса гранулы M=0,0124г. Исходя из формы шара, рассчитан диаметр гранулы 0,26см. Результаты расчета Gm приведены в таблице 2.6. По данному расчету определено, что для двух материалов К4 и К6 с концентрацией 0,6% и 0,5% соответственно, масса пробы 30 г недостаточна (требуется 104г и 125г). Из формулы (2.2) также вытекает, что минимальная концентрация компонента для пробы 30г должна составлять 2,1%. В ходе дальнейшего исследования определено, что для компонентов с концентрацией менее 2,1% диапазон ±3S попадает в область отрицательных значений концентрации, что физически невозможно. Но, во-первых, для оценки остальных компонентов размер пробы достаточен, во-вторых, в данном исследовании не изучаются гистограммы распределения компонентов, при этом среднеквадратичного отклонения оказалось достаточно для оценки качества смешения, в третьих это увеличило бы трудоемкость опыта в 4 раза и могло привести к ошибкам,

Таблица 2.6

Анализ представительности пробы

Компоненты	Вес компонента в пробе, г	Содержание компонента, %	Масса гранулы, г	Фактическое количество гранул в пробе, шт	N - минимально необходимое число гранул в пробе, шт	Gm – минимально необходимая масса пробы, г
К1	25,12	83,7	0,0118	2127	66	0,7
К2	2,20	7,3	0,0118	186	132	8,6
К3	1,18	3,9	0,0177	66	238	16,0
К4	0,17	0,6	0,0137	12	1597	104,2
К5	1,14	3,8	0,0211	54	246	16,4
К6	0,14	0,5	0,0209	7	1938	125,0
Итого	30	100,0	-	2452	-	-

Таблица 2.7

Таблица результатов исследования

Кпр	Период	X_{K1}	S_{K1}	X_{K2}	S_{K2}	X_{K3}	S_{K3}	X_{K4}	S_{K4}
21	П1	87,07	1,66	7,37	1,10	1,90	0,59	1,75	0,78
10	П2	86,76	1,36	7,06	0,79	1,99	0,20	2,11	0,77
29	П3	87,38	1,21	7,21	1,01	1,82	0,65	1,86	0,68
29	П4	87,54	1,45	7,23	0,89	1,96	0,64	1,52	0,43
21	П5	87,59	1,02	7,46	1,09	1,83	0,57	1,75	0,59
Кпр	Период	X_{K5}	S_{K5}	X_{K6}	S_{K6}	S_{sum}	$К_{фм}$	F%	V_F
21	П1	1,23	0,95	0,42	0,18	5,25	110	34,0	15,3
10	П2	1,44	0,67	0,64	0,24	4,03	148	37,9	11,4
29	П3	1,15	0,41	0,53	0,18	4,14	228	37,2	13,2
29	П4	1,04	0,47	0,67	0,49	4,37	225	41,0	13,5
21	П5	0,83	0,34	0,46	0,21	3,81	226	40,2	11,7

Первоначально был проведен анализ возможности применения в качестве входного параметра - среднеквадратичного отклонения одного из компонентов, то есть пробовали найти компонент, по которому можно оценивать качество всей смеси, но такого компонента не оказалось (см рис. 2.5).

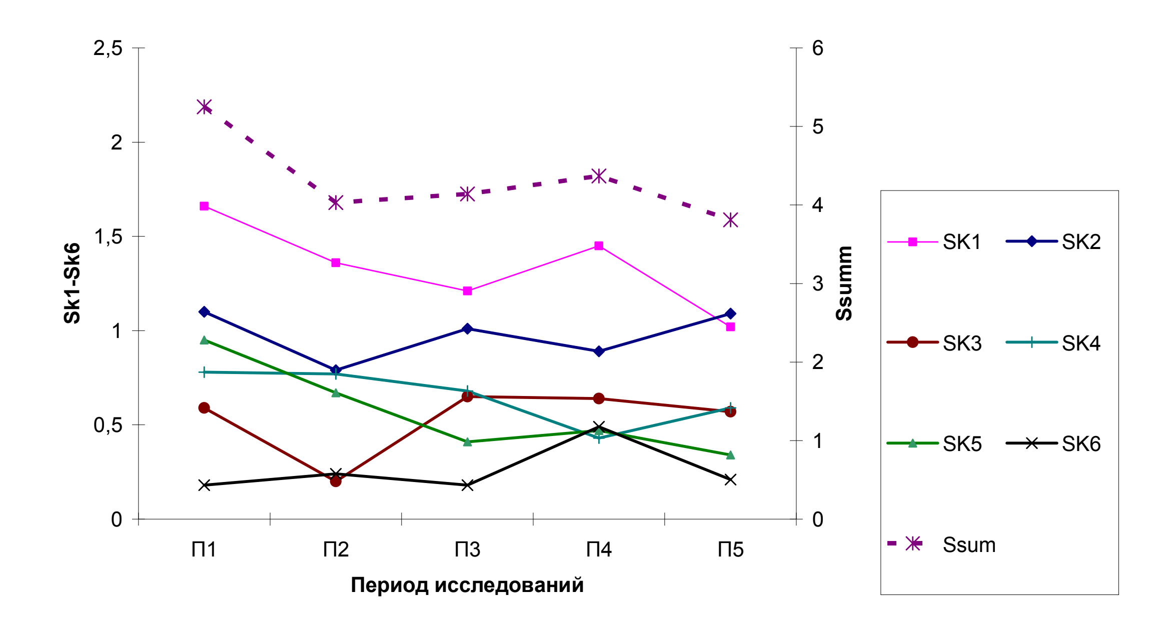


Рис. 2.5. Изменение среднеквадратичных отклонений компонентов S1-S6 и их суммы S_{sum}

Изменение суммарного среднеквадратичного отклонения для разных периодов не совпадает с динамикой изменения какого либо одного из шести компонентов То есть критерии оценки стабильности смешения по одному компоненту являются недостоверными. Это показывает анализ результатов исследования, приведенных в таблице 2.7, в наиболее стабильном периоде П2 (S_{sum} минимально), но стабильность компонентов К1, К4 и К6 не самая высокая.

Поэтому в качестве входной характеристики был выбран параметр – суммарное среднеквадратичное отклонение S_{sum} по всем компонентам. Величину S_{sum} можно считать комплексным критерием качества смешения для многокомпонентной системы.

Поиск выходной характеристики проводился методом регрессионного анализа, путем поиска уравнения вида $Y = m1x1 + m2x2 + ... + b$ где значения $x1, x2 ...xn$ – это физико-механические характеристики а Y – это S_{sum}..

Далее по критерию Стьюдента был найден значимый фактор – коэффициент вариации поперечного удлинения, который отражает

стабильность физико-механической характеристики. В таблице 2.8 приведено среднее значение относительного удлинения пленки F% в поперечном направлении и его коэффициент вариации V_F.

Уравнение регрессии $V_F=1,72+2,62S_{sum}$, имеет коэффициент детерминированности R2=0,87 и значение критерия Фишера F=19,5 что выше критического Fкр=10,13 (для степеней свободы V1=5-3-1=1 и V2=5-1-1=3 и уровня $\alpha=0,05$). Взаимосвязь между параметрами отражает график (рис. 2.6).

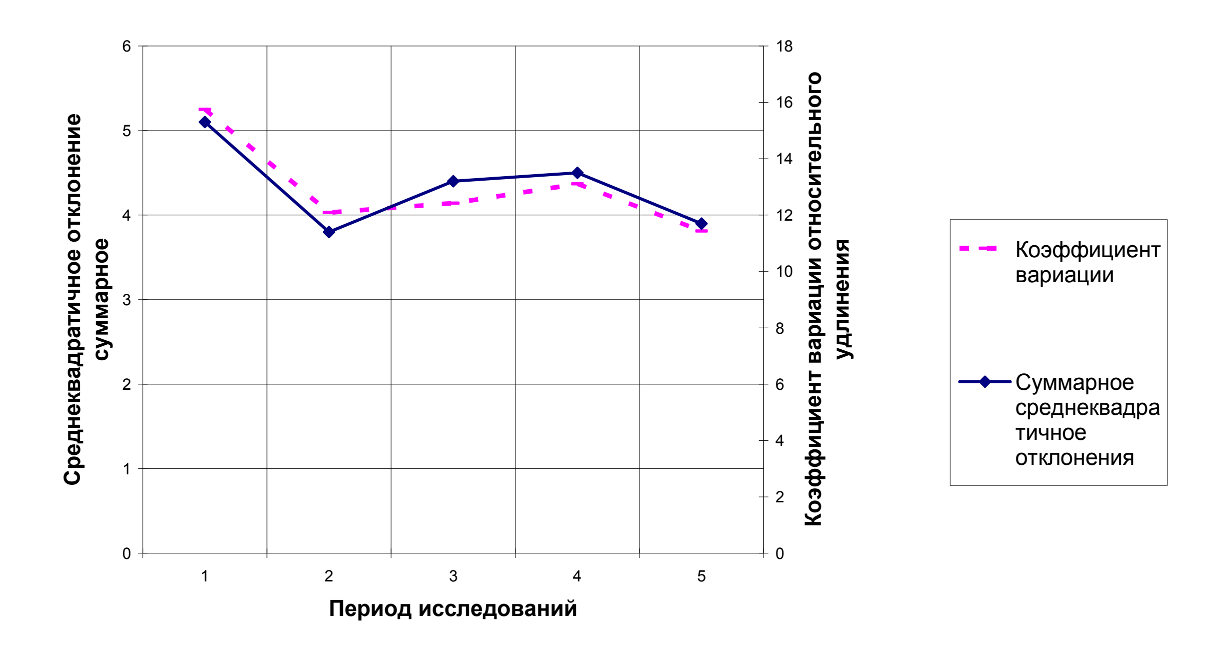


Рис. 2.6. Взаимосвязь коэффициента вариации относительного удлинения и суммарного среднеквадратичного отклонения

Как уже указывалось выше, коэффициент вариации относительного удлинения F% показывает стабильность физико-механических свойств. Уровень коэффициента вариации V_F =15% может быть принят как критический. Поэтому только период П1 может быть признан как неудовлетворительный с точки зрения стабильности физико-механических характеристик. С другой стороны минимальное значение коэффициента вариации в отдельных испытаниях достигает V_F=1%, стабилизация такого уровня – это задача дальнейших исследований.

Дополнительно провели анализ влияния точности дозирования каждого из шести компонентов (поочередно) на стабильность физико-механических свойств, глубина связи снижалась.

Итак, в результате экспериментальных исследований представительности проб смеси и физико-механических характеристик готовой пленки определено, что существует статистическая взаимосвязь между качеством смешения и стабильностью физико-механических характеристик, поэтому при разработке технологических процессов экструзии, особенно в условиях единичного производства при постоянно изменяющихся рецептурах необходимо обязательно предусматривать системный контроль качества смешения.

Суммарное среднеквадратичное отклонение S_{sum} позволяет оценивать качество смеси, но не является универсальным критерием качества смешения многокомпонентной системы, поскольку будет меняться от количества компонентов и их процентного содержания. В качестве универсального критерия предлагается применять индекс смешения [48].

2.1.3 Разработка и анализ индекса смешения как универсального критерия

Прежде всего отметим что для многокомпонентной системы коэффициент вариации (неоднородности) смеси применить нельзя так как отношение $V_i = Sk_i / Xk_i * 100\%$, меняется в зависимости от процентного содержания компонента, например в первом периоде П1: V_1 =1,91% , а V_2=14,9%, а процесс смешения был одинаков.

Проведем анализ предлагаемых [48] различных расчетных формул индекса смешения.

При этом необходимо оттолкнуться от следующих показателей смеси:

$$s_0{}^2 = c*(1-c) \quad . \qquad (2.3)$$

где с – концентрация компонента (в долях относительно единицы).

S_0^2 - дисперсия абсолютно несмешанной системы.

$$s_0 = \sqrt{c*(1-c)} \qquad (2.4)$$

S_0 – среднеквадратичное отклонение содержания компонента для абсолютно несмешанной системы

S - среднеквадратичное отклонение содержания компонента в пробах отбираемых в процессе эксперимента.

При этом дисперсия S^2 рассчитывается по формуле

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(C_i - C_{cp})^2}{n-1}$$

где C_i и C_{cp} - текущая и средняя концентрация содержания компонента в пробе, n – число проб.

σ^2 – генеральная дисперсия для абсолютно смешанной системы

$$\sigma^2 = \frac{c*(1-c)}{N}$$

где N-число частиц в пробе.

Индексы смешения предлагается рассчитывать по следующим соотношениям:

$I_1 = \sigma^2 / s^2$,
$I_2 = 1 - S^2 / S_0^2$,
$I_3 = 1 - S / S_0$,
$I_4 = (S_0^2 - S^2)/(S_0^2 - \sigma^2)$,
$I_5 = 1 - (S^2 - \sigma^2)/(S_0^2 - \sigma^2)$.

Для анализа чувствительности индексов проанализируем пример из [49] где рассматриваются четыре варианта распределения компонента.

Таблица 2.8

Результаты анализа качества смешения различных модельных систем

Система	***1***	***2***	***3***	***4***
Внешний вид смеси				
Общая оценка смешения	Абсолютно несмешанная система	Смешение неудовлетворительное	Смешение неудовлетворительное	Смешанная система
Распределение частиц	упорядоченное	упорядоченное	упорядоченное	случайное
Визуальная оценка качества смеси по 10 бальной шкале	**0**	**3**	**6**	**9**
Дисперсия измеренная (s^2)	0,105	0,0125	0,0021	0,00109
Среднеквадратичное отклонение, измеренное в процессе исследования проб (s)	0,324	0,1118	0,04583	0,03302
Дисперсия абсолютно смешанной системы*100 (σ^2*100)	0,1056	0,1056	0,1056	0,1056
Дисперсия несмешанной системы (s_0^2)	0,1056	0,1056	0,1056	0,1056
Среднеквадратическое отклонение для несмешанной системы (s_0)	0,325	0,32496	0,32496	0,32496
Индекс смешения 1 (I_1)	**0,010**	**0,084**	**0,503**	**0,969**
Индекс смешения 2 (I_2)	0,006	0,882	0,980	0,990
Индекс смешения 3 (I_3)	**0,003**	**0,656**	**0,859**	**0,898**
Индекс смешения 4 (I_4)	0,006	0,891	0,990	1,000
Индекс смешения 5 (I_5)	0,006	0,891	0,990	1,000

В таблице 2.7 приведены оценки качества смешения. Индексы I_1 и I_3 наиболее приемлемы, так как максимально близки к визуальной оценке несмешанных систем. Индексы I_2 I_4 I_5 не чувствительны в области почти смешанной системы. Индекс I_3 более просто применять на практике так как он не содержит параметра N – количество частиц в пробе, что очень важно для методов объемного отбора проб. Также I_3 имеет максимальную чувствительность для высокого уровня смешения (оценка 9 и более).

Следует отметить, для 4-й системы, где распределение получено методом генерации случайных чисел, индекс смешения I_3 = 0,898, поэтому этот уровень может быть принят в качестве граничного для принятия решения о качестве смешения, это значение было подтверждено и дальнейшими исследованиями (см. таблицу 2.8).

Итак, по результатам исследования многокомпонентной смеси (раздел 2.1.2) была показана взаимосвязь между суммарным среднеквадратичным отклонением компонентов в смеси S_{sum} и коэффициентом вариации относительного удлинения V_F . Для данного эксперимента был проведен расчет индекса смешения I_3. Результаты расчета индекса смешения представлены в таблице 2.9

Таблица 2.9

Наименование	К1	К2	К3	К4	К5	К6	*I_3 – среднее значение*	S_{sum}	V_F
Период 1	0,95	0,96	0,96	0,94	0,91	0,97	0,95	5,25	15,30
Период 2	0,96	0,97	0,99	0,95	0,94	0,97	0,96	4,03	11,40
Период 3	0,96	0,96	0,95	0,95	0,96	0,98	0,96	4,14	13,20
Период 4	0,96	0,97	0,95	0,97	0,95	0,94	0,96	4,37	13,50
Период 5	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,97	0,96	3,81	11,70

Все значения индекса смешения выше 0,898 поэтому качество смешения всех компонентов во всех периодах можно считать удовлетворительным. Индекс смешения I_3 не зависит от процентного содержания компонента, поэтому является универсальной оценкой.

Уравнение регрессии V_F =259–256,81*I_3 имеет коэффициент детерминированности R2=0,90 и значение критерия Фишера F=27,4 что выше

критического Fкр=10,3 (для степеней свободы V1=5-3-1=1 и V2=5-1-1=3 и уровня альфа=0,05), вычисления проведены с применением пакета анализа Excel. Взаимосвязь между параметрами также видна на графике (рис. 2.7). Следует отметить что значение критерия Фишера для уравнения V_F=1,72+2,62*S_{sum} составляет F=19,5, поэтому индекс смешения I_3 имеет более глубокую связь с качественными характеристиками пленки чем суммарное среднеквадратичное отклонение S_{sum}.

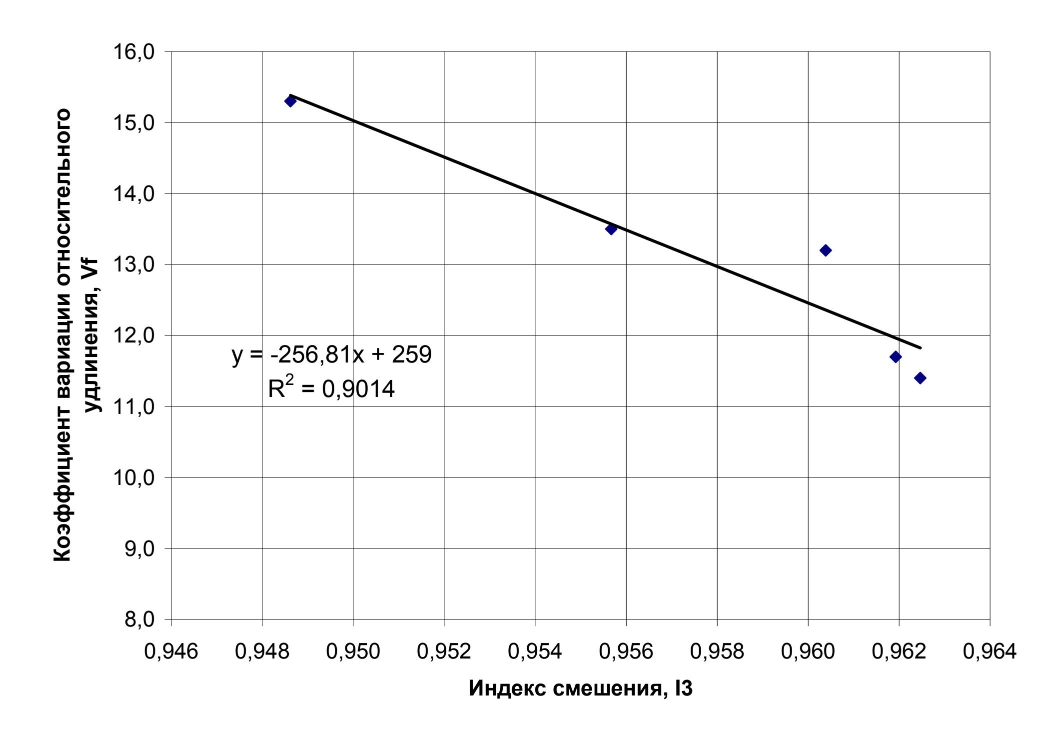


Рис. 2.7. Взаимосвязь индекса смешения и физико-механических свойств пленки

В данном исследовании диапазон изменения коэффициента вариации составляет от 11,4% до 15,7%. Причем это средние значения в периодах П2 и П1 соответственно. Уровень 15,7% можно считать критическим, желательно стабилизировать уровень 11%. С другой стороны каждое значение индекса смешения это также среднее значения для компонента в исследуемом периоде. В данном исследовании это 1 месяц. Но технологический процесс требует управления по результатам точечного контроля. Поэтому интерес представляет выработка критериев оценки каждой пробы.

2.1.4 Методика контроля качества смешения

Для выработки критериев оценки единичной пробы проведем анализ распределения отклонений для различных компонентов.

Таблица 2.10

Результаты контроля содержания различных компонентов в различных периодах

№	Среднее значение, %	Среднеквадратичное отклонение, %	Минимум	Максимум	Допуск min	Допуск max	Попадание в диапазон
Период	Xср	S_i	Xmin	Xmax	Xср-3S_i	Xср+3S_i	±3S
Исследование компонента №1							
П1	87,07	1,66	83,00	89,70	82,10	92,04	+
П2	86,76	1,36	85,50	89,40	82,68	90,84	+
П3	87,38	1,21	85,40	90,90	83,74	91,02	+
П4	87,54	1,45	82,50	90,80	83,19	91,89	-
П5	87,59	1,02	86,20	90,00	84,52	90,66	+
Исследование компонента №2							
П1	7,38	1,10	4,90	10,30	4,07	10,69	+
П2	7,06	0,79	6,10	8,50	4,69	9,43	+
П3	7,21	1,01	5,60	9,80	4,18	10,24	+
П4	7,23	0,89	5,90	9,20	4,54	9,91	+
П5	7,46	1,09	5,80	10,20	4,20	10,72	+
Исследование компонента №3							
П1	1,90	0,59	1,30	3,90	0,13	3,68	-
П2	1,99	0,20	1,60	2,20	1,38	2,60	+
П3	1,82	0,65	0,50	2,70	-0,12	3,76	+
П4	1,96	0,64	0,80	3,40	0,05	3,87	+
П5	1,83	0,57	0,60	2,90	0,12	3,55	+
Исследование компонента №6							
П1	0,42	0,18	0	0,70	-0,12	0,96	+
П2	0,64	0,24	0,2	1,00	-0,07	1,35	+
П3	0,53	0,18	0,2	0,94	-0,01	1,07	+
П4	0,67	0,49	0,2	2,20	-0,80	2,15	-
П5	0,46	0,21	0,1	1,00	-0,17	1,09	+

Анализ статистических данных таблицы 2.10 показывает, что диапазон ±3S почти полностью охватывает диапазон значений зафиксированных в периоде. В периодах максимально стабильных П2, П3 и П5 нет выходов за диапазон ±3S, в периодах П1 и П4 наблюдаются колебания смешение более чем ±3S. Поэтому выход единичной пробы за допуск ±3S уже свидетельствует о нестабильном смешении.

Проведем более глубокий анализ распределения на примере компонента К1. Результаты представлены в таблице 2.11.

Таблица 2.11

Статистический анализ результатов контроля проб для компонента К1 в разных периодах

Периоды наблюдений	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение	Минимум	Максимум	Общее количество проб	Количество проб лежащих в диапазоне			
	Xср	S_i	Xmin	Xmax		±S	±2S	±3S	±4S
Период 1	87,07	1,66	83,00	89,70	22	16	21	22	22
Период 2	86,76	1,36	85,50	89,40	10	8	10	10	10
Период 3	87,38	1,21	85,40	90,90	30	22	28	30	30
Период 4	87,54	1,45	82,50	90,80	30	24	28	29	30
Период 5	87,59	1,02	86,20	90,00	22	17	20	22	22
Всего	-	-	-	-	114	87	107	113	114
Всего, %	-	-	-	-	100	76,1	93,8	99,1	100

Только в одном периоде наблюдается выход за диапазон ±3S. 93,8% всех измерений лежит в диапазоне ±2S. Поэтому допуск ±2S может быть принят в качестве нормативного для контроля единичной пробы.

Нормирование значения Sн возможно если задаться некоторым граничным уровнем индекса смешения. Например, в данном исследовании можно принять, что нормативное значение индекса смешения должно быть $I_3 \geq 0{,}96$. Такое значение индекса смешения характерно для периодов П2, П3 и П5. Поэтому $\mathbf{0{,}96=1-S_н/S_0}$ и с учетом того что $s_0 = \sqrt{c*(1-c)}$, нормативное значение можно рассчитать:

$$S_н = 0{,}04*\sqrt{c*(1-c)}, \quad (2.5)$$

или в процентах

$$S_н(\%) = 0{,}04*\sqrt{c*(1-c)}*100. \quad (2.6)$$

Таким образом можно рассчитать требуемое значение среднеквадратичного отклонения компонента в пробе в зависимости от

концентрации компонента в рецепте при требуемом значении индекса (качества) смешения [56].

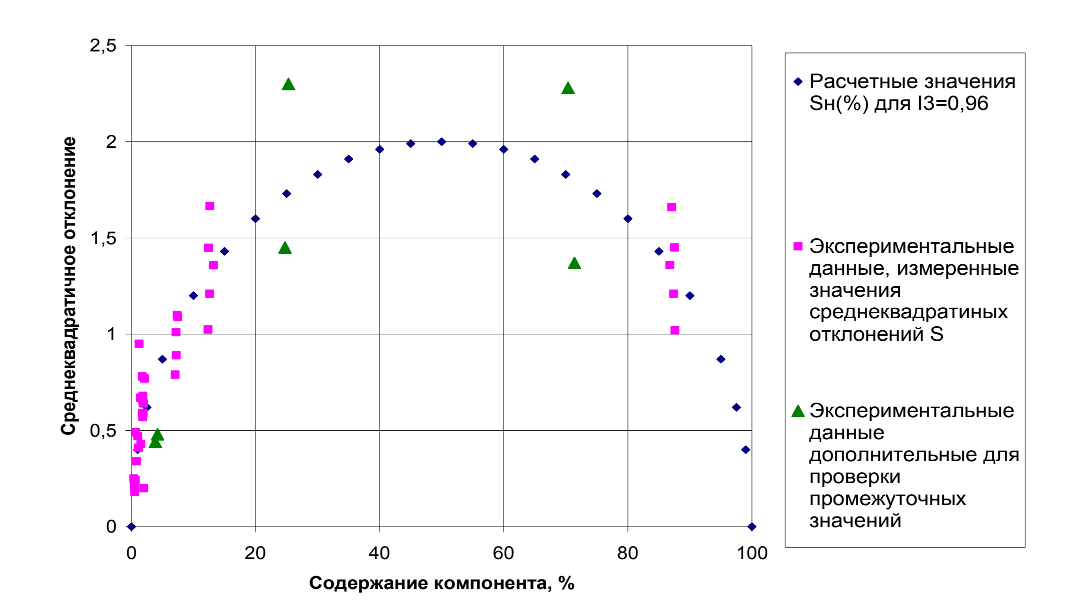


Рис. 2.7. Зависимость среднеквадратичного отклонения компонента в пробе от его процентного содержания в рецептуре в качественной смеси при I_3 =0,96

Поэтому можно предложить следующую методику принятия решений по результатам контроля единичной пробы:

1. Для каждого компонента К, в зависимости от заданной концентрации с, по формуле (2.6), рассчитывается нормативное среднеквадратичное отклонение в процентах Sн (%).

2. Контролируемая проба анализируется на предмет попадания в диапазон Хср±2Sн или Хз±2Sн, где Хз – заданное значение процентного содержания компонента (в нормально работающем дозаторе Хз≈Хср). То есть абсолютное отклонение Δi=|Xi-Хз| должно удовлетворять условию Δi≤2Sн, где Xi-измеренное значение процентного содержания i-го компонента в пробе.

3. Если результат Δi лежит в диапазоне Хср±2Sн следовательно работа дозатора в норме. Причем необходимо провести проверку по всем компонентам.

4. Если результат Δi выходит за диапазон Хср±2Sн анализируется выход за диапазон Хср±3Sн, если выходит, то работа дозатора некачественная.

5. Если же проба попадает в диапазон Хср±3Sн анализируются еще два результата идущие подряд после пробы где зафиксировано значительное отклонение, если хоть одна из проб выходит за диапазон ±2Sн можно считать что смешение некачественное и необходимо проводить техническое обслуживание смесителя. Иначе считается что выпад был единичным и работа в дозатора в норме.

Для контроля общей стабильности процесса, по итогам работы за период (более 1 месяца), анализируется фактическое среднеквадратичное отклонение Sф и сравнивается с нормативным Sн. При отклонении в большую сторону (Sф>Sн) можно считать, что смешение в целом за период некачественное и необходимо проводить техническое обслуживание смесителя.

Следует отметить что при значительном количестве компонентов в рецептуре (например более 5-ти) анализ по каждому компоненту достаточно трудоемкое занятие. Поэтому технологу необходимо определить рациональное значение количества контролируемых компонентов на основе анализа их влияния на свойства продукции и трудоемкости проведения контроля.

2.1.5 Разработка критерия качества смешения в единичной пробы

Так как параметры Sн и I_3 связаны между собой, и определено что единичная проба должна попадать в диапазон ±3Sн, то можно предложить оценивать качество распределения единичной пробы по неравенству $I_3 \geq 0,88$. Следует отметить, что это очень близко к значению $I_3 \geq 0,898$ которое было найдено для модельной системы (табл. 2.8).

Для уточнения данного критерия, было проведено исследование событий на экструзионной линии связанное со значительными сбоями в системе дозирования. Наблюдения проводили в течении 12 часов путем анализа состояния процесса экструзии и качества подготовки смеси. В период наблюдений на линии проводили ремонт дозатора.

Поскольку при анализе проб удобнее работать с процентным содержанием компонента (а не концентрацией в долях единицы) расчет проводили по формулам:

$$s_0 = \sqrt{X_{cp} * (100 - X_{cp})} \quad (2.7)$$

где X_{cp} – заданное процентное содержание компонента, %

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - X_{cp})^2}{n-1} \quad (2.8)$$

где, X_i - измеренное процентное содержание компонента в единичной пробе, %

При анализе исправности процесса использовали оценки изложенные в [57].

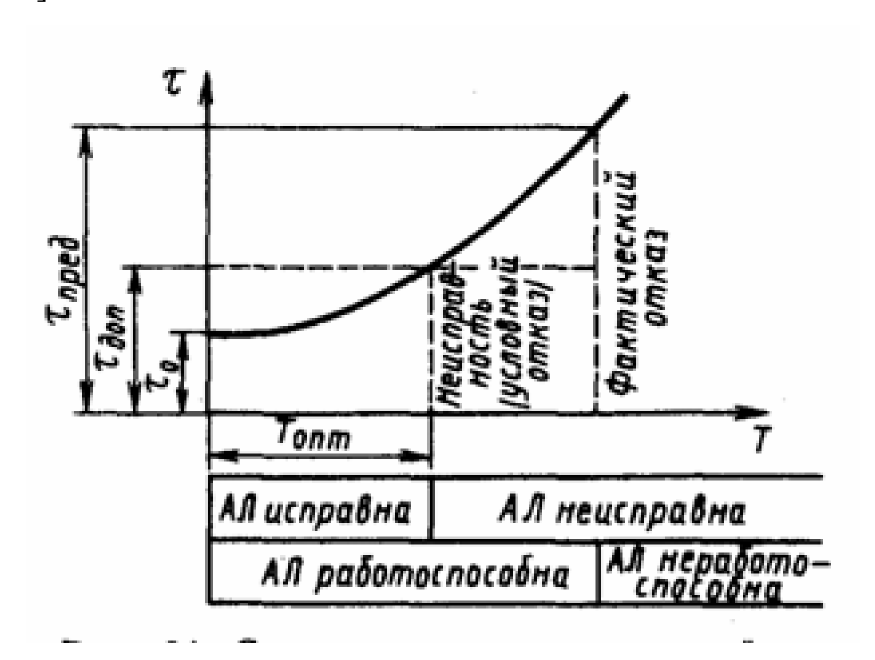


Рис. 2.8. Оценка состояния работы автоматического оборудования

Таблица 2.12

Анализ проб при различных состояниях процесса экструзии

Период	Оценка состояния процесса	Компонент	Хср	S_0	X_{11}	X_{12}	S	I_3
1	Линия неисправна и неработоспособна, (нестабильная работа линии, постоянная пульсация производительности экструдера)	К1	43,30	49,55	23,35	29,96	24,00	0,52
		К2	50,90	49,99	73,90	65,93	27,48	0,45
		К3	2,10	14,34	1,02	1,44	1,27	0,91
		К4	2,10	14,34	1,63	1,43	0,82	0,94
		К5	1,10	10,43	1,09	0,82	0,28	0,97
		К6	0,50	7,05	0,56	0,40	0,12	0,98
2	Линия неисправна и работоспособна, состояние условного отказа (периодически возникает пульсация производительности)	К1	43,30	49,55	30,56	30,00	18,42	0,63
		К2	50,90	49,99	63,50	62,10	16,86	0,66
		К3	2,10	14,34	1,70	2,74	0,75	0,95
		К4	2,10	14,34	2,70	3,03	1,11	0,92
		К5	1,10	10,43	1,10	1,76	0,66	0,94
		К6	0,50	7,05	0,44	0,37	0,14	0,98
3	Линия исправна и работоспособна	К1	43,30	49,55	43,60	37,30	6,01	0,88
		К2	50,90	49,99	50,05	57,28	6,44	0,87
		К3	2,10	14,34	1,90	2,17	0,21	0,99
		К4	2,10	14,34	2,51	1,62	0,63	0,96
		К5	1,10	10,43	1,60	1,22	0,51	0,95
		К6	0,50	7,05	0,34	0,40	0,19	0,97

Видим явную взаимосвязь нестабильной работы оборудования с качеством смешивания. Следует отметить, что выявлено нарушение дозирования и смешения основных компонентов.

В третьем периоде наблюдаются значения индекса 0,87, что меньше критического 0,88, поэтому работа смесительного оборудования имеет отклонения, которые не повлияли на «точечную» оценку процесса как – стабильная работа, но требуется дополнительное наблюдение за работой станции дозирования до нормализации процесса.

2.2 Управление температурой расплава

Для определения температур по зонам экструдера обычно предлагается некий диапазон, где возможно проводить переработку полимера. Исходя из состояния процесса: вязкости и прочности расплава, наличия непроплавов, подгоревших включений, стабильности производительности, тока двигателя,

давления в головке технолог проводит регулировку температурных режимов экструдера [58].

Для соэкструзии необходимо дополнительно учесть, во-первых, взаимное влияние соэкструдируемых пластмасс, поскольку итоговая температура расплава выравнивается при совместном течении в головке и, во-вторых, диапазон температур их совместной переработки, так как пересечение температурных диапазонов уменьшает область регулирования температур по сравнению с переработкой монослоя [43].

На рис.2.9 приведены температуры переработки различных полимеров. Видно, что диапазон их совместной переработки (пересечение температурных диапазонов) значительно уже, чем для переработки монослоя. Прогнозирование температуры расплава особенно важно для термочувствительных полимеров (EVOH, PVDC) и многослойных (многокомпонентных) композиций перерабатывающихся в узком температурном диапазоне.

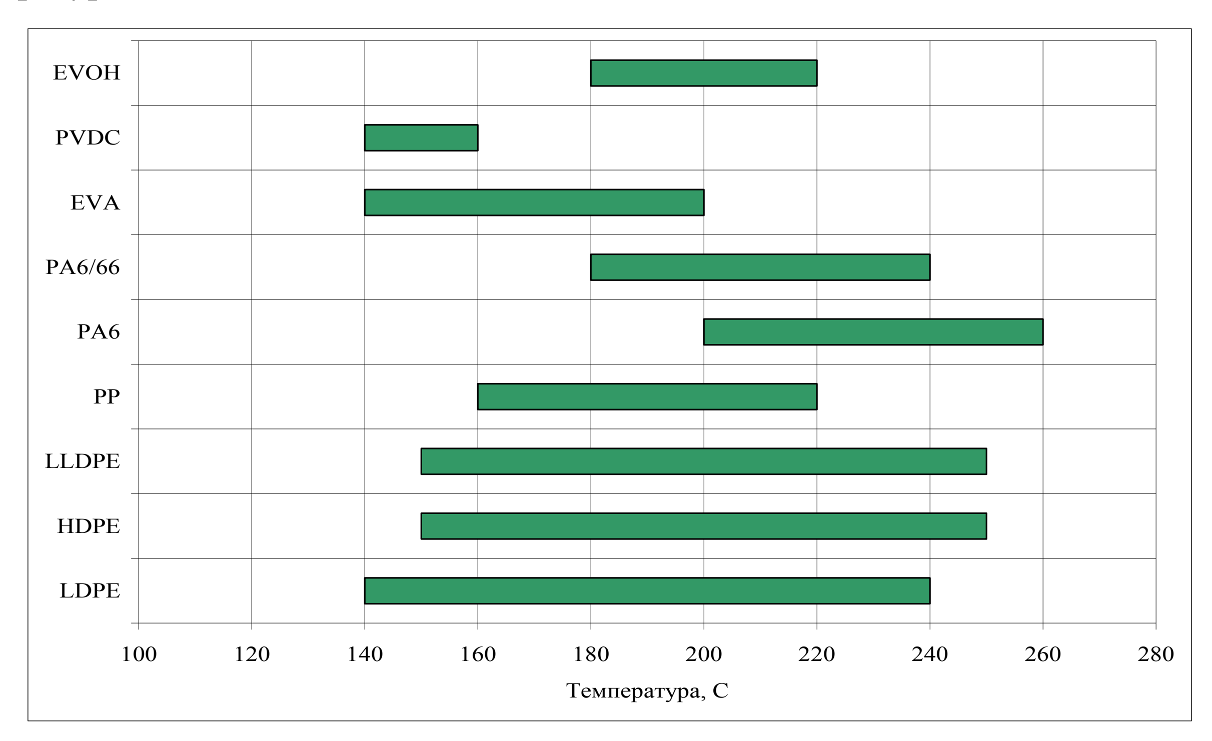


Рис 2.9 Температурный диапазон переработки некоторых полимеров

Современные многослойные структуры создаются для оптимизации различных видов пленки (термоусадочные с избирательным барьером,

высокобарьерные для стерилизации упакованного продукта, пленки с твист эффектом). При этом используются сложные структуры PA-EVOH-PA-TIE-LDPE, EVA-PVDC-EVA-PA которые изготавливаются не только за счет правильного подбора технологических режимов, но и ноу-хау в конструкции оборудования:

Современные многослойные структуры создаются для оптимизации свойств различных видов пленки. При этом используются сложные структуры, которые изготавливаются не только за счет правильного подбора технологических режимов, но и ноу-хау в конструкции оборудования [33], например:

- системы обогрева соэкструзионной головки позволяющие задать разницу между соседними зонами (слоями) головки 40^{o}C, стандартная конструкция дает 10^{o}C;
- технология инкапсулирования позволяющая подавать термочувствительный расплав температурой 160^{o}C в головку температурой 220^{o}C, без деструкции материала.

Но в целом последовательность (методология) задания температурного профиля соэкструзионной установки остается неизменной:

- определяется температура совместного течения в головке (Тг), как удовлетворяющая всем полимерам многослойной конструкции;
- выбирается температурный профиль экструдера и температура расплава как Тэ=Тг±(10÷50)^{o}C, при этом Тр=Тг+(10÷50)^{o}C если полимер работает (течет в головке) в низкой температурной области, и Тр=Тг-(10÷50)^{o}C если полимер работает в верхней температурной области.
- определяется температура «верхних», предшествующих зон головки, адаптеров (Та) в зависимости от рассчитанной температуры переработки полимера каждого слоя в экструдере Тэ и головке Тг, то есть стремятся приблизиться к среднему значению выбранного температурного диапазона переработки полимера.

Вопросы теплообмена глубоко проработаны в работах [34, 49, 52, 59]. Подробно рассмотрен процесс плавления и теплопередачи при движении пробки гранул от зоны загрузки до головки. Учитываются основные конструктивные параметры и частота вращения шнека, теплофизические характеристики полимера. Расчет температуры полимера ведут на каждом витке шнека путем анализа тепловыделений за счет вязкого трения с учетом температуры стенки цилиндра.

Но теоретические исследования проведены для определенных граничных условий для стандартной геометрии шнека, без учета теплопередачи в цилиндре и точности поддержания температуры, мощности обогрева, возможностей системы управления процессом, износа оборудования. При этом точность достаточно сложных моделей не очень высокая. Например, в [60] приведены результаты исследования плавления в одношнековом экструдере, в частности показано, что если модель Тадмора прогнозирует окончательное плавление на 16 витке, то в реальном процессе это происходит на 20 витке, причем всего в шнеке 21 виток. С учетом того, что начало плавления это 6-й виток, относительная погрешность модели составляет 50%.

Обычно технолог устанавливает некие допустимые рамки, где регулирует температурный профиль и температуру расплава в зависимости от вязкости и термостойкости рецепта, с учетом возможностей привода шнека и давления расплава. Причем всегда наблюдается линейная зависимость между заданной температурой по зонам экструдера и температурой расплава.

Собственно достаточно простой подход предлагается в современных исследованиях [41], где учитываются температурные характеристики полимера (точки кристаллизации, плавления, текучести), а температурный профиль устанавливается в процессе отладки технологического процесса. Такое положение вызвано тем, что практика в технологиях переработки пластмасс значительно опережает теорию. Например, в статье [61] анализируется методика управления температурой при соэкструзии, которую применяет оператор установки, при этом автор считает, что действия оператора в целом

неправильные, так как температура изменяется только на основе анализа температур по зонам экструдера, и не учитывается производительность, вязкость, ограничения по давлению в каждом экструдере и т.д.

Поэтому интерес представляет исследовать влияние температуры по зонам экструдера на температуру расплава, найти простые зависимости для инженерных расчетов и оперативного управления технологическим процессом, определить адекватность линейных зависимостей температуры расплава и уровень возможных ошибок.

2.2.1 Описание исследования температурных режимов

Для исследования рассмотрены 18 экструдеров, которые установлены на 4-х соэкструзионных установках [62]. Период наблюдений 1 месяц.

Управление температурами по каждой зоне обеспечивается микроконтроллером с встроенным ПИД регулятором. Каждая температурная зона экструдера снабжена модулем нагрева и охлаждения. Регуляторы отражают не только текущую и заданную температуру, но и процент включения нагревателя или охладителя, поэтому можно видеть в каком режиме (с подводом или отводом тепла) работает каждая зона экструдера.

При такой конструкции системы обогрева температура в каждой зоне поддерживается постоянной не зависимо от тепловыделений в экструдере. Точность поддержания температуры (при оптимальных настройках параметров ПИД регулятора) $\pm 1^{o}$C.

Для оценки влияния технологических режимов на температуру расплава проводился регрессионный анализ. Поиск решения проводился в виде зависимости

$$y=a_1x_1+a_2x_2+ \quad + a_nx_n +b.$$

Таблица 2.13

Конструктивные параметры исследуемых соэкструзионных установок

Параметр/слой	A (внешн.)	B	C	Д	E (внутр.)
Диаметр шнека, мм	45	25	C1,2,4=45 C3=30	25	30
Максимальная частота вращения, об/мин	160	150	160	150	160
Материал (основной)	PA-6 EVA	Tie EVA	LDPE, PVDC	Tie EVA	PA-6 EVA
Мощность нагревателей в зонах экструдера	2,0	1,0	2,0	1,0	1,5
Мощность привода, кВт	30	15	30	15	20

Диапазон варьирования факторов определялся технологическими режимами, которые имеют достаточно широкий диапазон из-за мелкосерийного характера производства. Исследуемые параметры и диапазон их варьирования показаны на примере одной из машин в таблице 2.14.

Таблица 2.14

Диапазон варьирования факторов для соэкструзионной установки №3

Экструдер		Факторы вход						выход
		P	N	Q	Q/N	I	Тср	Тр
		бар	об/мин	кг/час	кг/60об	А	^{o}C	^{o}C
A	мин	135	25	12	0,45	17	257,8	250
	макс	245	50	22	0,52	25	263,2	265
B	мин	83	5	0,3	0,04	1,4	183,3	205
	макс	131	15	0,8	0,06	2,1	193,3	215
C	мин	139	80	7	0,06	9	228,5	220
	макс	309	160	12	0,11	17	241,3	240
Д	мин	93	5	0,3	0,05	1,5	172,8	205
	макс	147	15	0,6	0,07	2,3	187,3	225
E	мин	107	40	5	0,12	4,7	244,5	225
	макс	279	75	10	0,15	9,1	266	260

2.2.2 Анализ результатов исследования температурных режимов

Во всех экструдерах выявлена статистическая взаимосвязь между анализируемыми технологическими параметрами и температурой расплава, поскольку расчетное значение критерия Фишера больше табличного.

Анализ показывает, что значащим фактором (для уровня α=0,05) в 17-ти экструдерах из 18-ти, является средняя температура по зонам экструдера Тср, причем во всех экспериментальных данных имеется прямо пропорциональная взаимосвязь между Тср и температурой расплава Тр.

Значимость остальных факторов проявляется в отдельных экспериментах. Например для экструдера А1 наиболее значимым фактором является давление расплава.

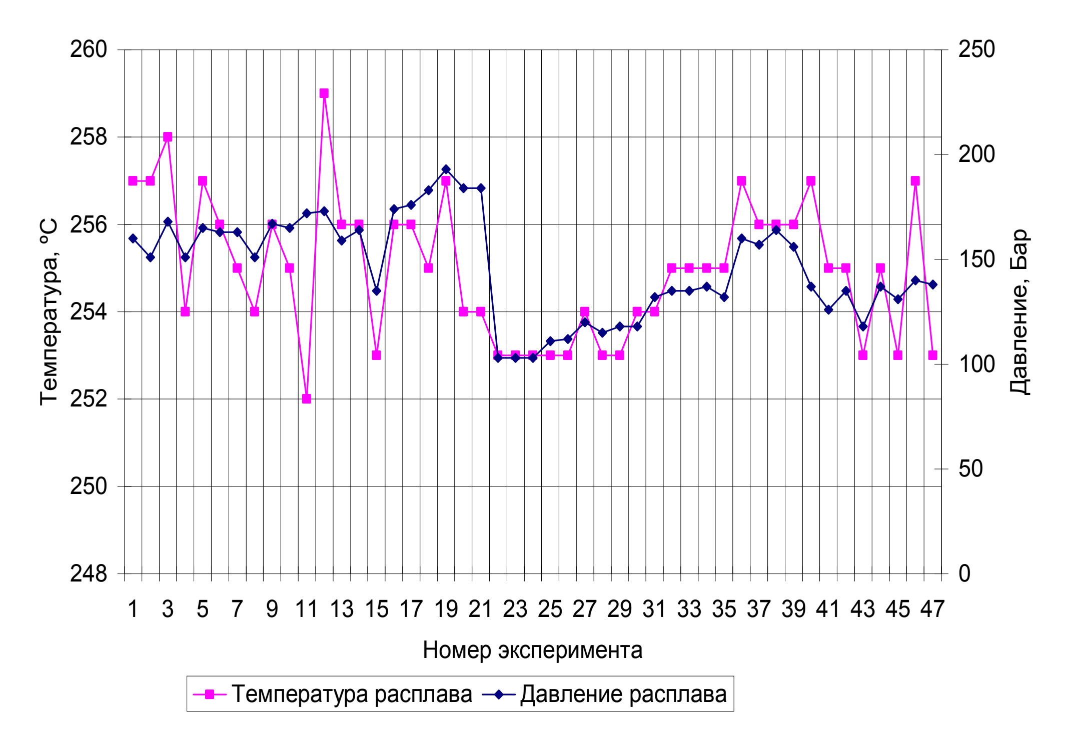


Рис.2.10. Динамика изменения давления и температуры расплава для экструдера А1

Для экструдера С3 выявлено влияние частоты N на Тр, но для экструдера Д3 эта зависимость отрицательная. Также для экструдера А1 выявлено влияние отношения Q/N, но для остальных экструдеров такая закономерность не подтверждается.

Не выявлено значимое влияние частоты вращения и тока двигателя, хотя уровень варьирования частоты вращения для экструдеров С и Е происходил в широком диапазоне, и для С3 был зафиксирован широкий диапазон частот вращения до 79-158об/мин. Но при высоких оборотах шнека система терморегулирования поддерживает температуру путем отвода тепла

воздушным охлаждением и перегрев расплава из-за сил вязкого трения не происходит. Хотя следует отметить, что анализ отдельных точек показывает, что в области частот вращения 150-160об/мин для шнека диаметром 45мм периодически наблюдается неконтролируемое повышение температуры расплава.

Проводился регрессионный анализ для определения коэффициентов в уравнении Тр= a_1*Тср.

На графиках представлены экспериментальные значения Тр и прогнозирование по средней температуре по зонам экструдера

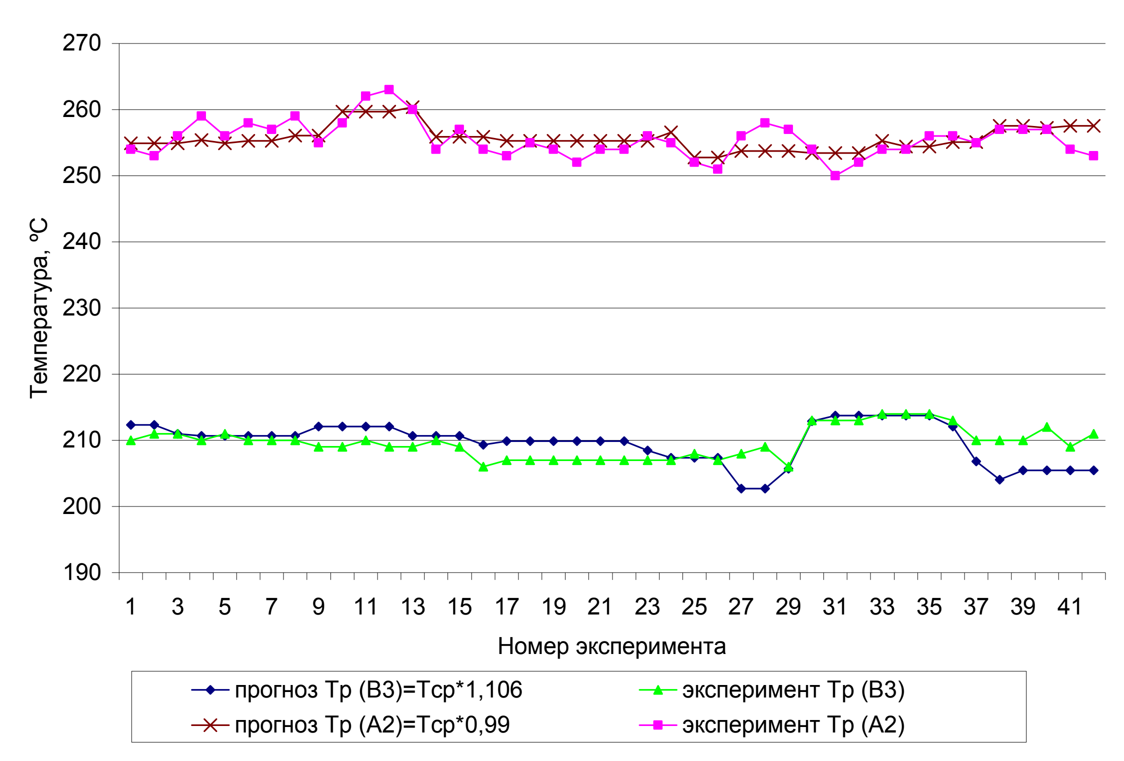


Рис.2.11. Прогнозирование температуры расплава по среднему значению температуры по зонам экструдера

Погрешность прогнозирования температуры по уравнению Тр= a_1*Тср, для диапазона ±2S составляет ±12,8%. Для различных экструдеров существует свой уровень коэффициента a_1. Анализ технологических режимов показывает, что коэффициент зависит от температурного профиля экструдера.

Таблица 2.15

Усредненные значения температур по зонам для различных экструдеров

Экструдер	№ установки	Т1	Т2	Т3	Т4	Т5	Т6	Материал	Коэффициент a_1	Характер температурного профиля экструдера
A1, A2, A3	1, 2, 3	225	273	277	273	268	250	PA6	0,98	Температура с забросом в средних зонах
C1, C2, C3	1, 2, 3	175	235	258	253	245	242	LDPE	1,00	
E1, E2, E3	1, 2, 3	226	268	275	270	265	252	PA6	0,90	
A4	4	150	165	170	170	175	170	EVA	1,06	Ровный профиль
B4	4	150	160	170	170	170	170	EVA	0,96	
C4	4	128	142	150	155	155	155	PVDC	1,01	
B1, B2, B3	1, 2, 3	118	156	193	208	223	224	EMA	1,10	Температура с постепенным повышением
D1, D2, D3	1, 2, 3	106	144	182	198	214	223	EMA	1,18	

Итак чем больше заброс температуры в первых зонах тем ниже значение коэффициента a_1 в уравнении Тр= a_1 Тср (для a_1 диапазон 0,9-1,2).

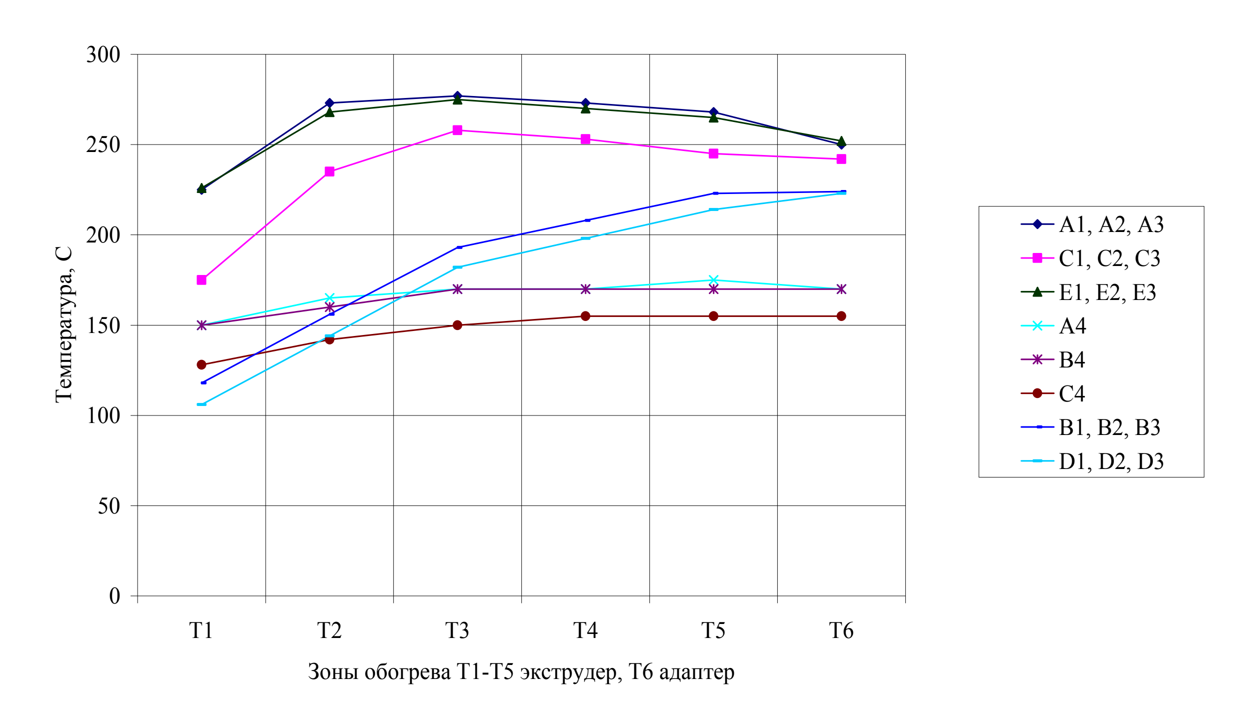


Рис. 2.12. Характерные температурные профили

Таблица 2.16

Рекомендации по управлению температурным профилем при соэкструзии

Характер температурного профиля	Обобщенное уравнение прогнозирования температуры расплава	Рекомендации по применению профиля
Постепенный подъем температур	Тр=1,15*Тср	Универсальный наиболее широкое применение
Ровный профиль	Тр=1,05*Тср	Для единичных, не отлаженных процессов
С «забросом» в первых зонах	Тр=0,95*Тср	Для интенсификации плавления и смешения

В процессе данного исследования был найден новый технологический параметр процесса экструзии – процент включения нагревателей и вентилятора охлаждения. То есть данный параметр показывает количество подводимой или отводимой энергии в зоне обогрева. Параметр является стандартным для микропроцессорного регулятора. Анализ данного параметра позволяет более глубоко и оперативно находить температурный профиль для обеспечения стабильного процесса экструзии.

Таблица 2.17

Типичный уровень процента включения нагревателей

Зона экструдера	1	2	3	4	5	Частота вращения шнека	Температуры по зонам экструдера	Температура расплава
Процент включения	25	5	0	-5	-25	100	230-255	250
	30	20	10	5	0	50	235-270	250

Увеличение частоты вращения шнека требует снижения заданной средней температуры нагрева, так как больше тепла выделяется за счет трения.

2.3 Управление производительностью экструдера

Постоянное изменение рецептов, широкое варьирование номенклатуры красителей (использование более 50 марок на одном рабочем месте в течении месяца), итоговое значительное колебание минерального наполнителя в составе слоя от 0% до 20% и как следствие реологической характеристики,

приводят к нестабильной зависимости производительности от частоты вращения шнека. Сложным становится прогнозирование производительности при выборе оборудования и определении конструкции шнека, стандартные подходы требуют уточнений из-за широкой планируемой номенклатуры рецептов.

Системы гравиметрического дозирования обеспечивают автоматический подбор частоты вращения шнека в зависимости от требуемой производительности. Но даже здесь возникают проблемы: колебательные процессы (раскачка производительности), длительный подбор необходимой частоты вращения из-за неустойчивой производительности, разгон шнека до максимальной частоты вращения из-за «зависания» экструдера [63].

Параметром, по которому происходит выработка управляющего воздействия в гравиметрических системах, является отношение производительности к частоте вращения Q/N (удельная или специфическая производительность).

Для обеспечения контроля и анализа технологического процесса в условиях единичного соэкструзионного производства необходимо:

- провести статистический анализ варьирования параметра Q/N в рамках существующей технологии;
- установить граничные значения (допуски) Q/N для прогнозирования и предупреждения брака и поломок оборудования;
- установить принципы управления по параметру Q/N для повышения стабильности процесса.

2.3.1 Описание исследования производительности экструдера

Исследование проводилось на 3-х соэкструзионных установках оснащенных гравиметрической системой дозирования. Количество экспериментальных точек 729, общее количество рецептур 21шт.

Таблица 2.18

Параметры исследуемых соэкструзионных установок

Параметр/Экструдер	А (внешн.)	В	С	Д	Е (внутр.)
Диаметр шнека, мм	45	25	С1,С2=45 С3=30	25	30
Мощность привода, кВт	30	15	30	15	20
Максимальная частота вращения, об/мин	160	150	160	150	160
Материал (основа)	PA	TIE	LDPE	TIE	PA
Производительность мин-макс, кг/час	10-25	0,3-1,1	7-14	0,3-1,1	5-15
Процент ввода красителя мин-макс	0-25	0	0-30	0	0-30

Таблица 2.19

Результаты измерения параметра Q/N

№ линии	Исследуемый параметр/Экструдер	А	В	С	Д	Е
3	Q/N ср	0,474	0,055	0,091	0,063	0,133
	Ср квадр откл	0,015	0,005	0,008	0,004	0,008
	Q/N мин	0,435	0,038	0,061	0,052	0,120
	Q/N макс	0,514	0,063	0,109	0,070	0,152
	Коэффициент прямого потока α	0,459	0,064	0,127	0,064	0,159
1	Q/N ср	0,328	0,058	0,196	0,057	0,097
	Среднеквадр откл	0,010	0,003	0,018	0,006	0,013
	Q/N мин	0,315	0,053	0,160	0,043	0,084
	Q/N макс	0,357	0,062	0,233	0,068	0,129
	Коэффициент прямого потока α	0,359	0,064	0,260	0,064	0,127
2	Q/N ср	0,465	0,054	0,293	0,059	0,132
	Q/N мин	0,428	0,050	0,224	0,042	0,118
	Q/N макс	0,494	0,059	0,406	0,065	0,162
	Среднеквадр откл	0,017	0,003	0,053	0,005	0,011
	Коэффициент прямого потока α	0,459	0,064	0,459	0,064	0,159

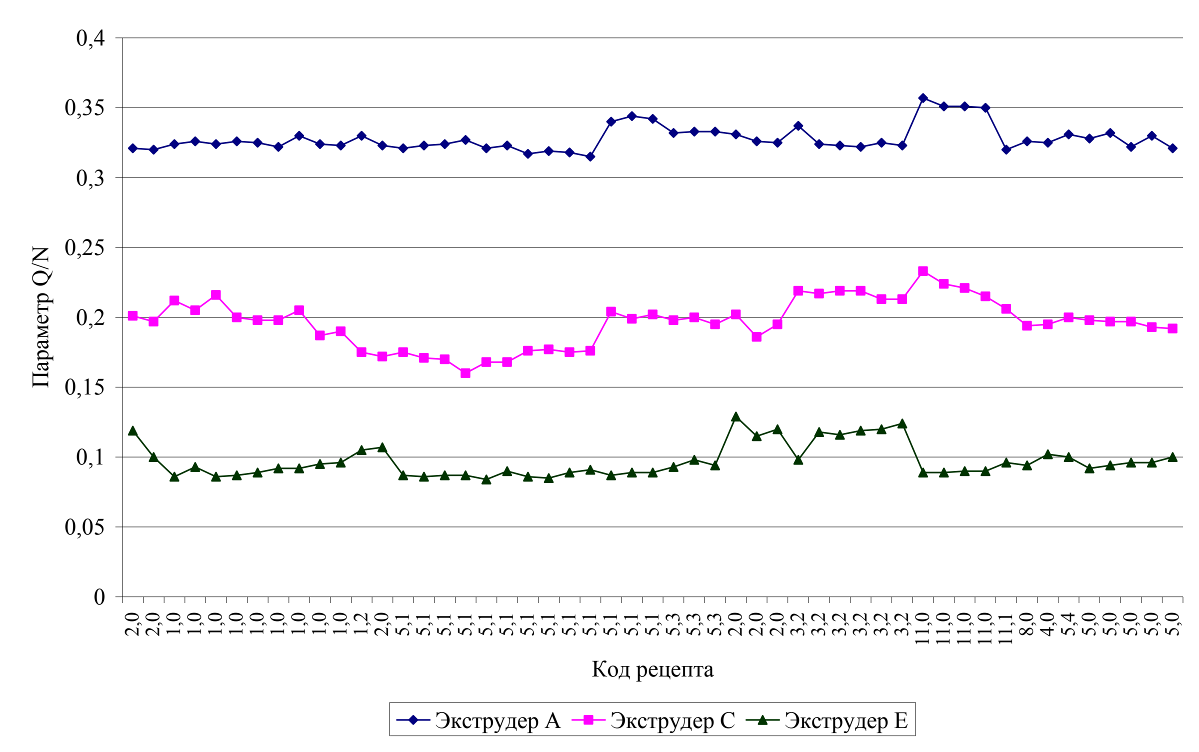


Рис. 2.13. Динамика изменения параметра Q/N при переходах и работе линии на разных рецептах

2.2.2 Анализ результатов исследования производительности экструдера

Анализ удельной производительности (параметра Q/N) показывает, что данный параметр при качественном протекании процесса экструзии может варьироваться в диапазоне:

- ±3% для одного рецепта и стабилизированного процесса (по производительности, температуре и давлению)
- ±7% для одного рецепта и всего диапазона технологических режимов по производительности и температуре расплава.
- ±15% для если анализировать разные рецепты (номенклатуры) и весь рабочий диапазон скоростей вращения шнека и температур экструдера).

Причем значительное отклонение появляется когда используется более 15% минерального наполнителя (рис 2.14).

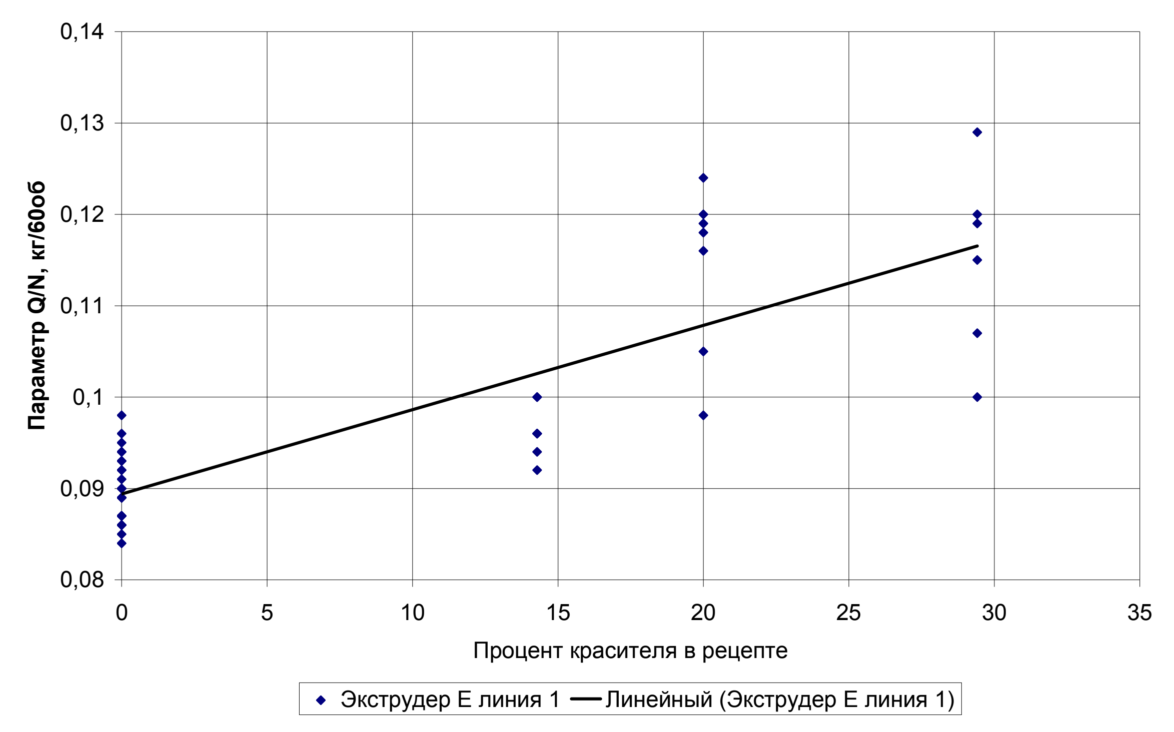


Рис. 2.14. Влияние наполнителя на параметр Q/N

Добавление минерального наполнителя, суперконцентрата полиамидного красителя на основе TiO_2 приводит к возрастанию параметра Q/N. Максимальные значения Q/N зафиксированы на максимальных окрашенных рецептах (рис. 2.14). Заметное увеличение параметра Q/N на 5-10% происходит уже при содержании 7% красителя.

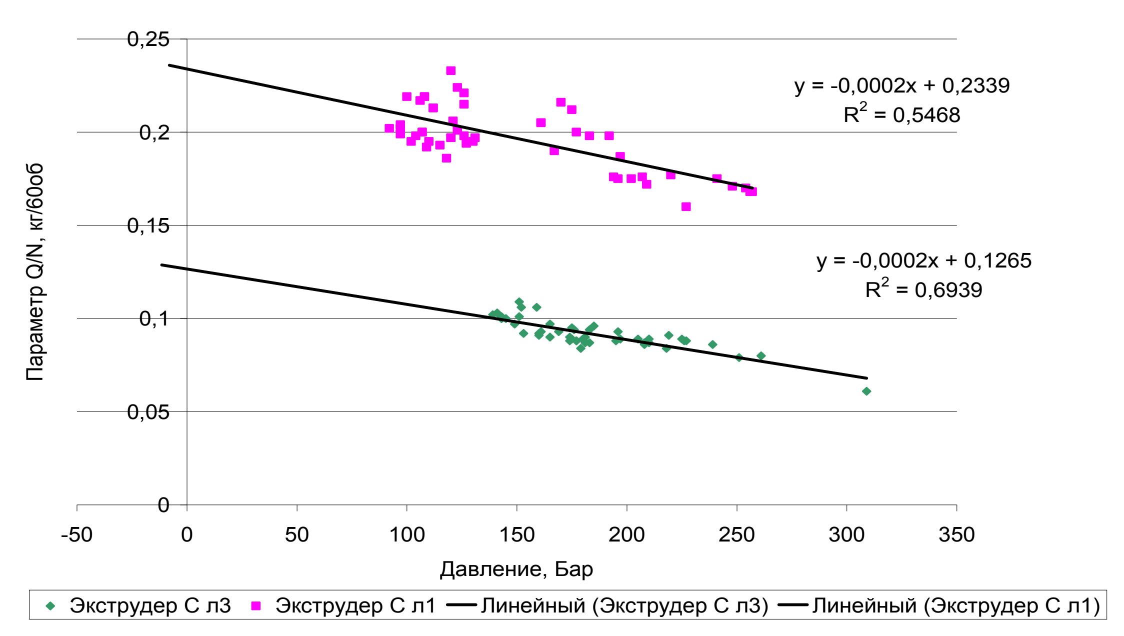


Рис. 2.15. Зависимость параметра Q/N от давления. Прогноз точки максимального значения, когда давление равно нулю

Следует отметить, что вязкость красителей ниже чем основного сырья поэтому теоретически параметр Q/N должен снижаться при снижении вязкости но на практике может наблюдаться и обратное.

При работе в области высоких температур стабильность параметра Q/N снижается.

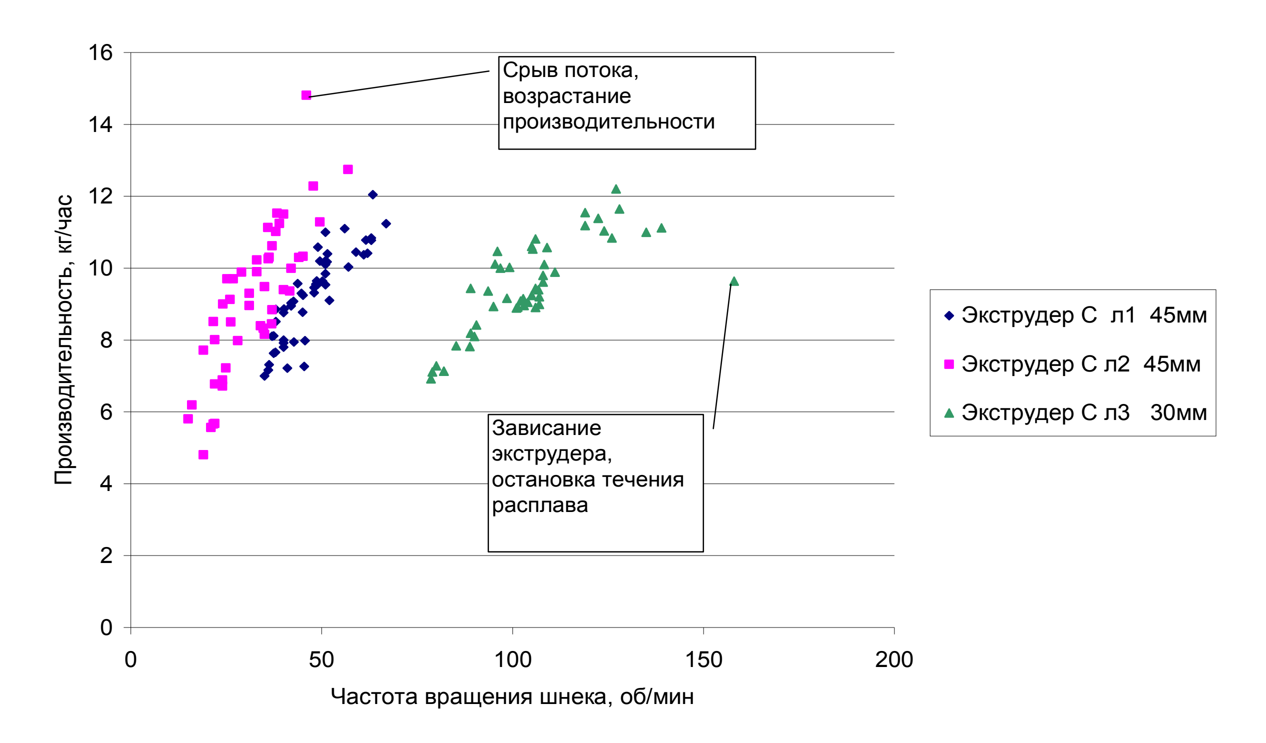


Рис. 2.16. Зависимость производительности от частоты вращения для различных экструдеров. Переработка смесей LDPE и суперконцентратов красителя на основе LLDPE

Параметр Q/N позволяет прогнозировать критические ситуации в технологическом процессе например для экструдера С линия 3 минимальное значение 0,061 выявлено для «зависшего» экструдера где частота 158об/мин и резко снижается производительность (рис 2.16). Такая ситуация приводит к неконтролируемому разогреву расплава за счет внутреннего трения.

2.3.3 Расчет удельной производительности экструдера по конструктивным параметрам

Параметр Q/N может быть рассчитан из конструктивных параметров шнека на стадии проектирования технологического процесса.

Известно [34], что прямой поток в экструдере *Qd* определяется: из соотношения $Qd=\alpha*N$, где α - коэффициент прямого потока, N – частота вращения шнека. Коэффициент прямого потока $\alpha = V/2$, где V – объем витка шнека в зоне дозирования. Приближенно $\alpha \approx \pi DH(D-e)/2$, где D- диаметр шнека, H – глубина канала в зоне дозирования, e – осевая ширина гребня витка.

Анализ конструктивного параметра α и зафиксированных значений параметра Q/N, показывает, что максимальные значения параметра Q/N лежат в диапазоне (0,9-1,1)*α, то есть могут быть определены на стадии проектирования технологического процесса. Следует отметить, что при экструзии полимера в высокой температурной области, например переработка LDPE при температуре 240^0C (то есть при низкой вязкости расплава), уровень значений параметра Q/N может лежать в диапазоне (0,6-0,7)*α.

При контроле технологических режимов, снижение параметра Q/N ниже, чем на 50% от α свидетельствует о нарушениях в технологическом процессе (значительное повышение давления или снижение вязкости, перегрев расплава), требуется корректировка температур или проведение ремонта экструдера (рис. 2.16).

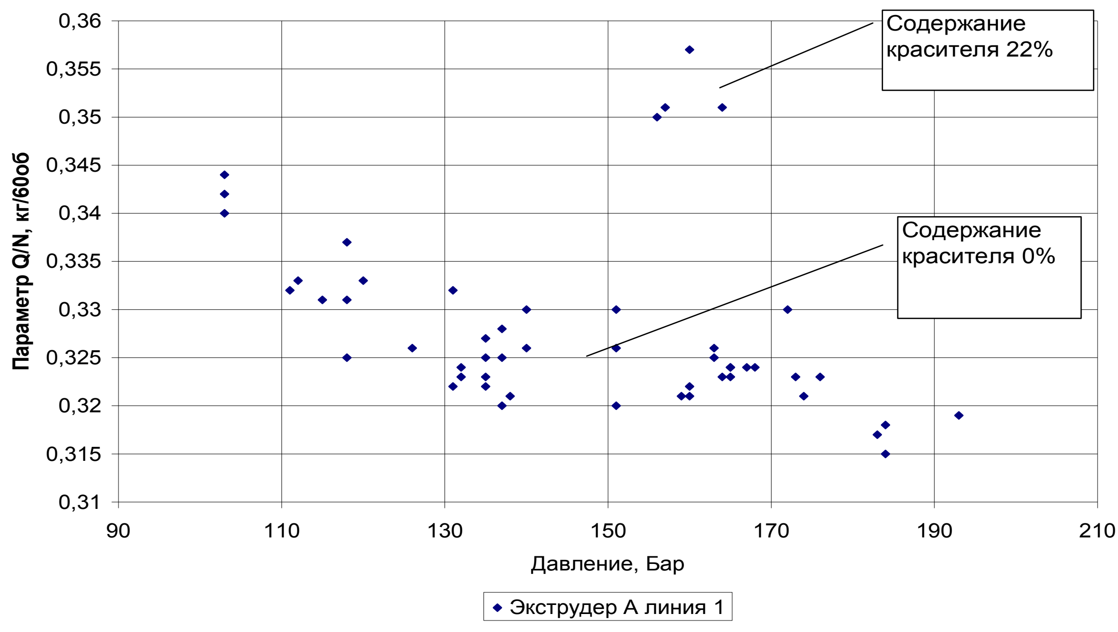


Рис. 2.17. Влияние минерального наполнителя и давления на параметр Q/N

Высокие значения (уровень 1,1*α) могут показывать низкий уровень смешения в экструдере так как снижается так называемый обратный поток который усиливает смесительное действие экструдера. Но происходит интенсификация скольжения расплава на стенках шнека и при таких значениях более быстро и качественно протекает промывка экструдера. Собственно поэтому минеральный наполнитель наиболее часто применяется как один из компонентов чистящих добавок.

Необходимо отметить, что область высоких частот вращения является более неустойчивой. При работе экструдера в нижней области диапазона частот вращения шнека, при снижении производительности, автоматическое увеличение частоты вращения гравиметрической системой управления стабилизирует процесс. При высоких значениях Q/N, проблем с поддержанием заданной производительности так же не возникает, так как есть резерв для управления скоростью вращения.

Также интерес представляет управление температурами по зонам экструдера для стабилизации характеристики Q/N и выравнивания расхода. При определении зон для регулировки температур, необходимо анализировать установленный диапазон и текущие значения, учитывать что снижение параметра Q/N может происходить из-за недостаточной производительности зоны загрузки или повышения давления из-за проблем в области формующей головки.

2.4 Регулирование качества продукции

Качественные характеристики гибкого многослойного материала можно разделить на следующие:

1. Геометрические параметры (толщина, ширина, вес, длина).
2. Внешний вид пленочного материала в проходящем и отраженном свете (включения, непроплавы, полосы, механические царапины, неоднородности, замятия, матовость, структура поверхности и т.д.)
3. Внешний вид намотки, однородность и плотность намотки в рулоне.

4. Физико-механические свойства.

Как правило контроль 95% качественных характеристик пленочных полимерных материалов проводится в течении 30 минут с момента изготовления образца. Измерение других параметров, в частности проницаемости, может занимать до 24 часов, в зависимости от методики и оборудования.

Качественные характеристики полимерных пленочных материалов меняются в процессе хранения, но обычно, после выдержки продукции в течении 24часов в условиях оптимальных для хранения, все параметры стабилизируются.

При разработке требований к качеству следует различать:

- требования, которые характеризуют, отличают одну номенклатуру серийной продукции от другой;
- требования, которые показывают стабильность качественных характеристик в образце продукции, в рамках определенной номенклатуры.

Стабильность свойств одного образца удобно оценивать с помощью коэффициента вариации:

$$v = \frac{s}{\bar{x}}$$

где

S – среднеквадратичное отклонение параметра X,

$\bar{x}$ - среднее значение параметра X.

Исследования стабильности полимерных пленочных материалов и анализ значений коэффициента вариации показал, следующую закономерность:

- v<10% - характеристики имеют высокую стабильность;
- при значениях v от 10% до 15% - стабильность параметра достаточная, процесс в пределах нормы;
- при значениях v от 15% до 20% в технологическом процессе есть неполадки, требуется корректировка;

- при v>20% в параметр нестабильный, есть нарушения технологического процесса которые требую оперативного устранения.

Требование к качественным характеристикам определенной номенклатуры нормируется путем установки диапазона минимум-максимум для каждой измеряемой характеристики.

Важным элементом обеспечивающим стабильность качества продукции, является классификация и группировка различных номенклатур для разработки общих (единых) методов, параметров и таблиц контроля качества. Такие таблицы позволяют уточнить требования к каждой номенклатуре, упрощают разработку новых видов продукции, обобщают требования к работе оборудования, способствуют оперативному обучению персонала, позволяют проводить улучшения качества продукции в комплексе по нескольким номенклатурам продукции.

Группировку технологических процессов проводят по используемому оборудованию и единству технологической оснастки. Это связано с большим разнообразием дизайна, схем компоновки и систем управления современного оборудования предназначенного для изготовления одинаковых многослойных структур гибких полимерных материалов.

2.4.1 Исследование взаимосвязи качественных характеристик продукции и технологических режимов

В процессах изготовления полиамидных рукавных пленок методом Three-bubble барьерные характеристики определяются структурой многослойного материала и рецептурой каждого слоя [64], контроль проводиться выборочно, особенно если выявлены нарушения в процессах приготовления смесей или в качестве сырья.

Основными качественными параметрами, которые настраиваются и контролируются при каждом переходе и переналадке, являются физико-механические и термоусадочные свойства полиамидной рукавной пленки [65],

которые в процессах Three-bubble регулируются соответствующими коэффициентами растяжки и усадки [66, 67]. Для определенной номенклатуры (рецептуры) коэффициенты растяжения могут меняться для различных периодов изготовления из-за изменения свойств сырья, что в свою очередь требует подбора температур экструзии, также может меняться интенсивность охлаждения, износ тянущих пар, скорость движения рукава и соответственно скорость термофиксации. Поэтому устанавливается диапазон регулирования для каждого коэффициента. Важно устанавливать допуски и правила регулирования таким образом, чтобы за один шаг обеспечить требуемые свойства продукции.

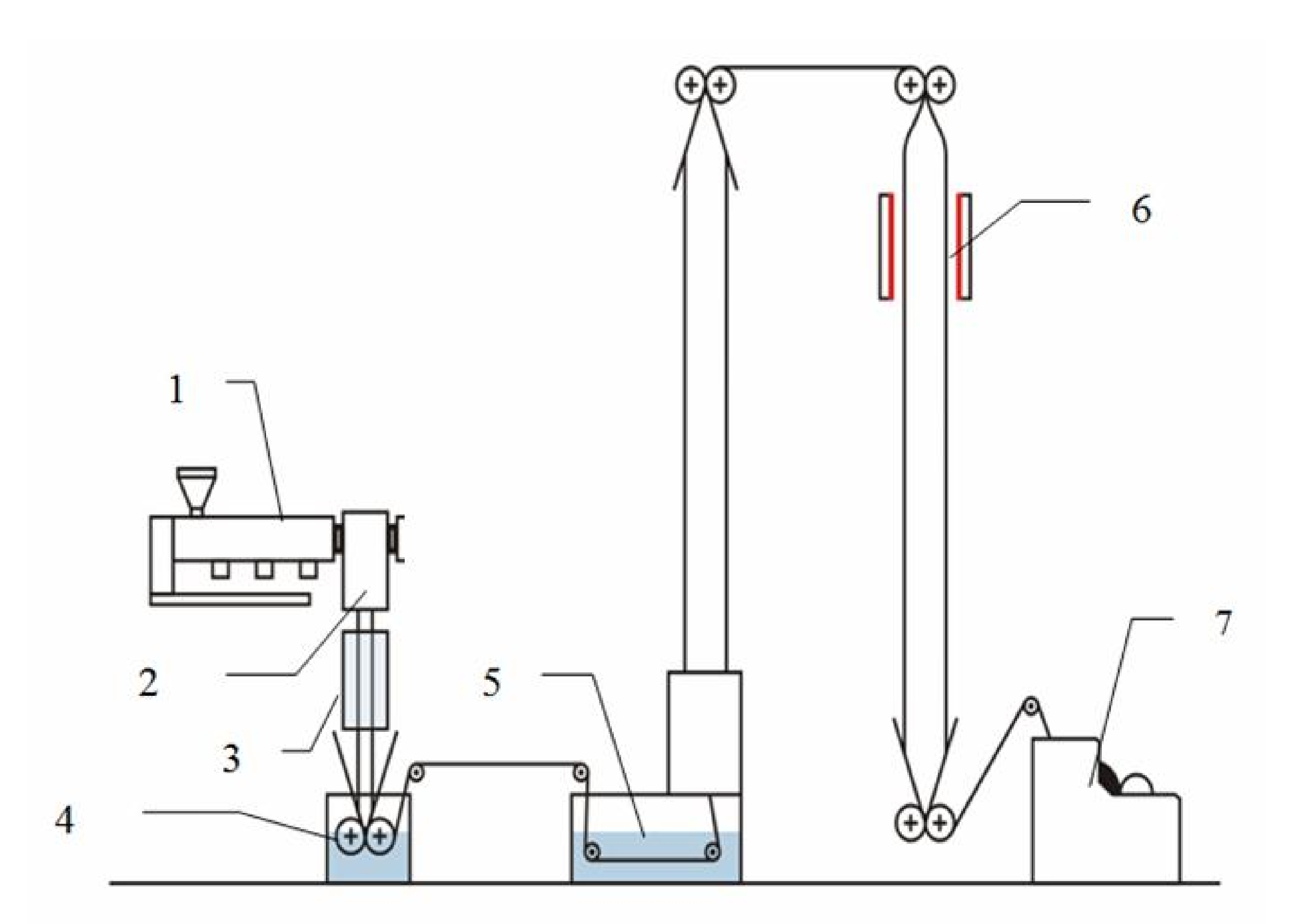


Рис. 2.18. Схема процесса Three-bubble, изготовление однослойной рукавной пленки, 1-экструдер, 2- соэкструзионная головка, 3 – узел охлаждения и калибровки первичного рукава, 4 – тянущая пара валков, 5 – узел разогрева первичного рукава для последующего раздува и ориентации, 6 – узел разогрева для термофиксации, 7 – узел намотки в рулон

Таблица 2.20

Технологические параметры процесса для полиамидной пленки, диаметры готовых рукавных термоусадочных пленок 20-40мм

№ п/п	Наименование параметра	Диапазон регулирования	Обозначение
1	Температура расплава в соэкструзионной головке, ^oC	235-255	T_1
2	Температура воды охлаждения первичного рукава в калибраторе, ^oC	8-14	T_2
3	Температура первичного рукава перед раздувом и ориентацией, ^oC	70-80	T_3
4	Температура рукава после термофиксации, ^oC	130-150	T_4
5	Температура перед намоткой, ^oC	20-35	T_5
6	Диаметр первичного рукава, после калибратора (перед узлом разогрева), мм	5-15	D_1
7	Диаметр рукава после ориентации (перед 3-й парой валков), мм	20-60	D_2
8	Диаметр рукава на намотке (между 5-й парой валков и намоткой), мм	20-40	D_3
9	Скорости тянущих пар №1-5, м/мин	100-300	V_{1-5}
10	Коэффициент продольной растяжки	2,3-2,7	V_3 / V_1
11	Коэффициент продольной усадки	0,8-0,9	V_5 / V_4 ($V_3 \approx V_4$)
12	Коэффициент поперечной растяжки	3,4-3,7	D_2 / D_1
13	Коэффициент поперечной усадки	1,10-1,25	D_2 / D_3

Одним из эффективных методов определения закономерностей взаимосвязи технологических параметров и характеристик продукции является метод регрессионного анализа.

2.4.2 Описание исследования.

Для уточнения требований к технологическим режимам изготовления термоусадочных полиамидных рукавных пленок, отбирались образцы готовой пленки 1-3 раза в смену с каждой из 3-х линий. За период наблюдений – 1 месяц было отобрано n=277 образцов продукции. С каждого образца измерялись физико-механические характеристики в продольном и поперечном направлении. При этом для получения одной характеристики (одной точки)

проводили по 4-ре разрыва, за результат принимали среднее значение. Параллельно фиксировали технологические режимы при которых изготавливались образцы рукавной пленки.

В период наблюдений выпускалась широкая номенклатура пленок по диаметру (19мм-24мм), всего 6 различных калибров, и цвету (содержание красителя от 0 до 3%), всего 5 различных вариантов цвета.

Экструдер диаметром 45мм, диапазон рабочих частот вращения 80-110об/мин. Противодавление в головке 150 - 240Бар.

В качестве входных факторов приняты коэффициенты продольной и поперечной растяжки и усадки.

Таблица 2.21

Диапазон варьирования технологических факторов

Значение	Факторы вход			
	D_2 / D_1	D_2 / D_3	V_3 / V_1	V_5 / V_4
	X1	*X2*	*X3*	*X4*
Xmin	3,49	1,14	2,39	0,82
Xmax	3,64	1,22	2,64	0,90
$\bar{x}$	3,57	1,18	2,53	0,85
S	0,02	0,01	0,04	0,02

В качестве выходных характеристик последовательно анализировались физико-механические характеристики пленки в продольном и поперечном направлении: напряжение Rm и относительное удлинение Fmax при разрыве, жесткость Rm/ Fmax как отношение напряжения к удлинению при разрыве.

Таблица 2.22

Статистические данные по физико-механическим характеристикам

Значение	Толщина, мкм	Факторы выход (Y), n=277					
		вдоль			поперек		
		Rm, МПа	Fmax, %	Rm/Fmax МПа/%	Rm, МПа	Fmax, %	Rm/ Fmax МПа/%
Xmin	17	156	80	1,4	215	38	4,1
Xmax	22	234	136	2,6	345	70	6,7
$\bar{x}$	19	201	111	1,8	273	53	5,2
S	1	14	10	0,2	20	6	0,4

Поиск выходной характеристики проводился методом регрессионного анализа, путем поиска уравнения вида $Y = m1x1 + m2x2 + ... + b$ где значения $x1, x2 ...xn$ – это коэффициенты растяжки и усадки, а Y – это одна из физико-механических характеристик.

2.4.3 Анализ результатов

Значение коэффициентов в уравнении регрессии для различных физико-механических характеристик, и соответствующие значения коэффициентов Фишера (F) и детерминированности R^2 приведено в таблице 2.23 , вычисления проведены с применением пакета анализа Excel.

Таблица 2.23

Результаты регрессионного анализа взаимосвязи технологических режимов и характеристик пленочного материала

Физико-механические характеристики (Y)		Коэффициенты в уравнении регрессии					F-критерий	R^2
		m4	*m3*	*m2*	*m1*	*b*		
вдоль	Fmax	-141,0	-33,0	-199,0	-65,9	785,7	17,7	0,21
	Rm	290,3	34,4	177,6	-91,5	-17,4	14,1	0,17
	Rm/Fmax	5,03	0,94	5,01	0,23	-11,62	49,6	0,42
поперек	Fmax	-16,3	-40,6	82,9	-65,4	304,7	13,0	0,16
	Rm	-92,4	-122,6	-279,0	-126,1	1442,4	7,2	0,09
	Rm/Fmax	-0,73	1,47	-13,80	3,90	4,54	21,2	0,24

Число степеней свободы эксперимента составили f1=4, f2=272.

При числе степеней свободы f1=4, f2=200 критические значения критерия Фишера:

- для уровня значимости альфа=0,05 F_t=2,42;
- для уровня значимости альфа=0,01 F_t=3,41.

Рассчитанные значения F- критерия для всех шести уравнений выше табличного, поэтому все уравнения имеют статистическую значимость.

Необходимо отметить низкий уровень коэффициента R^2 , поэтому относительная погрешность прогнозирования в отдельных точках (например для параметра Rm вдоль) достигает 26%, но для большей части экспериментальных точек, (для диапазона ±2S) относительная погрешность прогнозирования с помощью уравнений регрессии менее 15%.

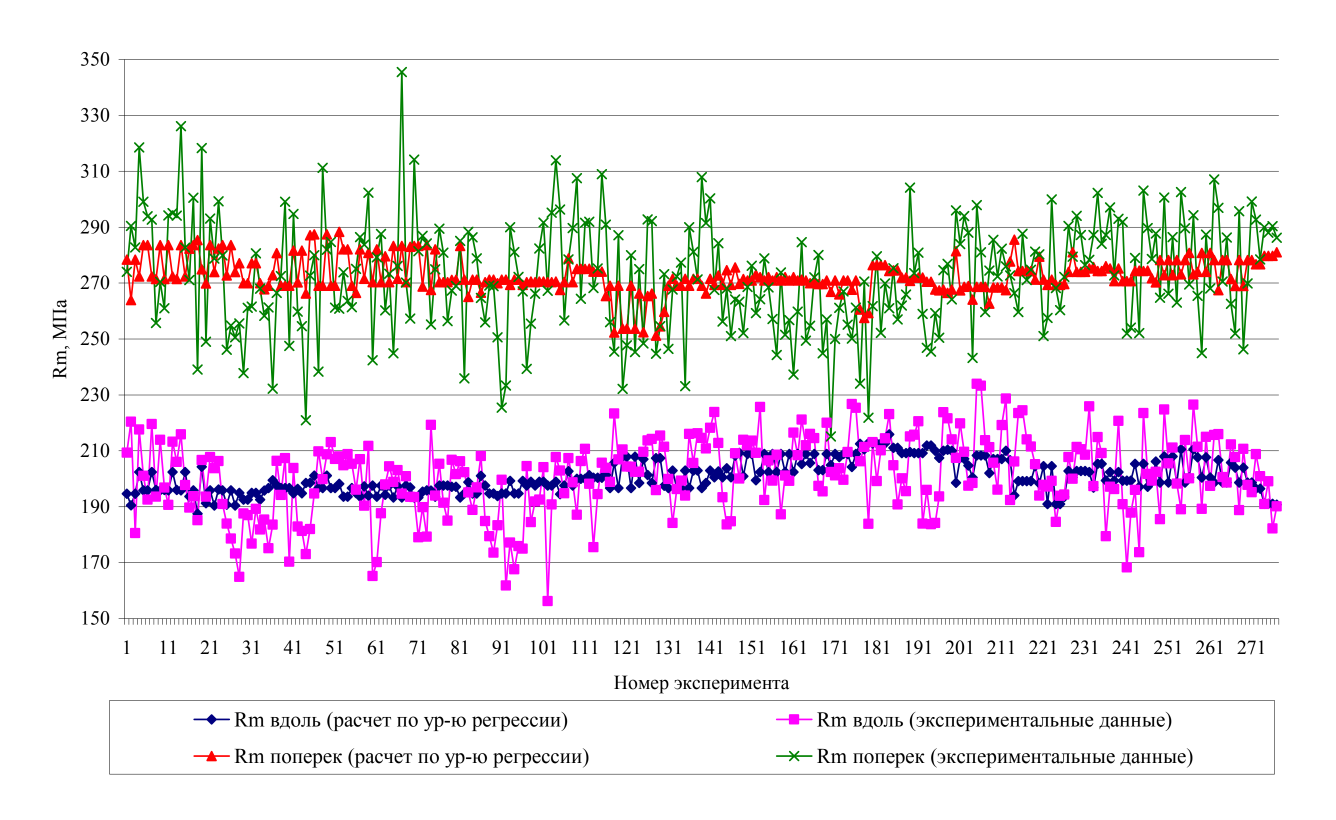


Рис. 2.19. Напряжение по разрыве, экспериментальные данные и прогноз согласно уравнений регрессии

По критерию Стьюдента были найдены значимые факторы, то есть коэффициенты которыми регулируются соответствующие механические характеристики.

Таблица 2.24

Значения критерия Стьюдента для исследуемых технологических факторов

Факторы выход		Факторы вход				
Физико-механические характеристики		V_5/V_4 *M4*	V_3/V_1 *m3*	D_2/D_3 *m2*	D_2/D_1 *m1*	*b*
Вдоль	Fmax	**-4,61**	-2,34	**-5,09**	-2,68	7,32
	Rm	**6,38**	1,63	3,05	-2,50	-0,11
	Rm/Fmax	**10,18**	**3,96**	**7,96**	0,51	-6,72
Поперек	Fmax	-0,87	**-4,68**	**3,46**	**-4,34**	4,62
	Rm	-1,36	**-3,91**	-3,22	-2,31	6,05
	Rm/Fmax	-0,53	2,30	**-7,85**	**3,53**	0,94

Критические значения критерия Стьюдента, при числе степеней свободы f2=200:

- для уровня значимости 0,05, t=1,97;
- для уровня значимости 0,001, t=3,34.

Анализ данных таблицы 2.24 показывает что коэффициенты имеют комплексное воздействие, причем коэффициенты усадки (V_5/V_4 и D_2/D_3) обладают более значимым воздействием, чем коэффициенты растяжки (V_3/V_1, D_2/D_1). Также следует отметить, что изменение только диаметра D_2 меняет оба поперечных коэффициента и с учетом того что $V_5/V_4 \approx V_5/V_3$, изменение скорости V_3 изменяет оба продольных коэффициента. Коэффициенты растяжки влияют более прогнозируемо – изменяют жесткость соответствующей характеристики. Поэтому при разработке технологического процесса для определенной номенклатуры следует отрабатывать и устанавливать такие допуски по физико-механическим характеристикам, чтобы у оператора была возможность путем изменения только коэффициентов растяжек V_3/V_1 и D_2/D_1 достичь заданных характеристик. При этом коэффициенты растяжек оператор должен регулировать путем изменения параметров V_1 и D_1.

В то же время для разработки новых видов продукции, с другим соотношением физико-механических характеристик, технологу следует прежде всего отрабатывать и устанавливать соответствующие коэффициенты усадки.

2.5 Выводы по второму разделу:

1. Контроль качества смешения является обязательным в экструзионных технологиях применяющих многокомпонентные рецептуры, так как существует влияние процесса смешивания на качество пленочной продукции.
2. Индекс смешения $I_3 \geq 0,96$ является комплексным и универсальным критерием качества смешения при анализе и сопоставлении периодов работы смесительного оборудования.
3. Контроль и анализ единичной пробы необходимо проводить на основе статистических методов, путем анализа среднеквадратичного отклонения содержания каждого компонента в единичной пробе и его попадания в нормативный диапазон ±3Sн.
4. Уровень индекса смешения $I_3 \geq 0,88$ является граничным для анализа единичной пробы для компонента с любым процентным содержанием.
5. Температуру расплава удобно прогнозировать по средней температуре зон экструдера с учетом характера температурного профиля. Относительная погрешность прогнозирования для диапазона ±2S составляет ±12,8%.
6. Контроль и анализ параметра удельной (специфической) производительности Q/N позволяет предупреждать нарушения в технологическом процессе соэкструзии и определять выход на новые режимы в процессах переходов.
7. Для разработки технологических режимов и регулирования качественных характеристик продукции достаточно эффективно использовать метод линейной регрессии.

Раздел 3. Моделирование экструзионных процессов

3.1 Моделирование распределительных каналов экструзионных головок на основе сдвигового течения.

Качество полимерного изделия зависит от равномерности распределения расплава в канале экструзионной головки. Точность поддержания толщины слоя обеспечивается конструктивными параметрами распределительных каналов головки, а также технологическими параметрами переработки полимерного материала. Основное назначение распределительного канала экструзионной головки состоит в приеме расплавленного полимера, придании ему кольцевой формы с минимальной разнотолщинностью, дополнительной пластикации и гомогенизации полимерного материала, поддержании или некотором повышении температуры полимерного расплава, а также создании сопротивления движению полимера, необходимого для поддержания определенного режима экструзии.

Разработаны различные формы копильников и геометрия распределительных каналов, но в соэкструзионных головках для изготовления рукавных многослойных пленок применяются распределители с боковой подачей материала, из которых можно выделить два типа – см рис. 3.1.

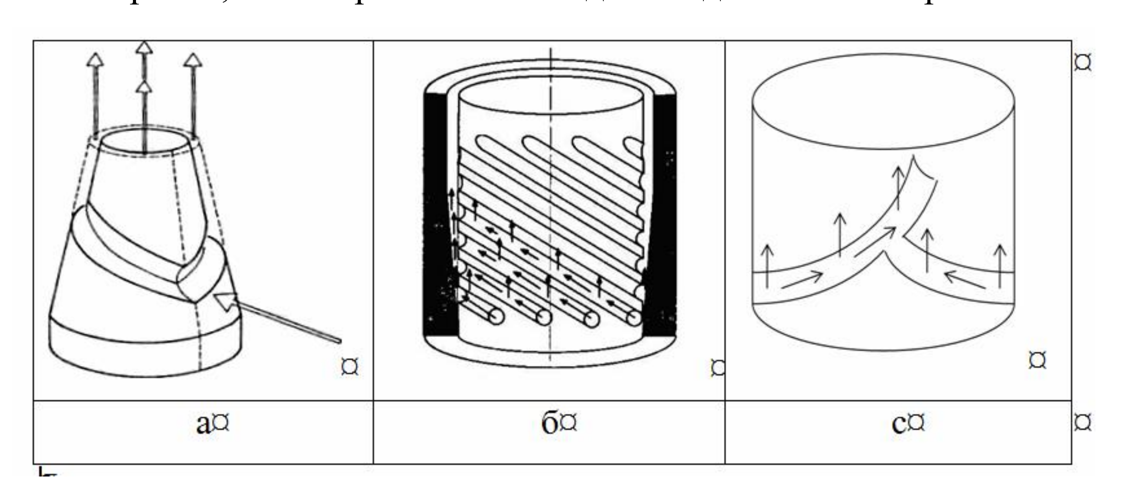


Рис. 3.1. Основные типы распределительных каналов используемых в соэкструзионных головках (а- копильник в виде кольца с боковой подачей, б – головка со спиральными распределительными копильниками, с – развитие конструкции копильника в точке слияния потоков)

Копильник кольцевого типа рис. 3.1 а, хотя и кажется «устаревшим», широко применяется особенно для термочувствительных полимеров, при этом геометрия канала очень разнообразна и постоянно совершенствуется. В частности появились каналы со смещенной несимметричной точкой слияния потоков, для устранения возможных застойных зон и ускорения промывок рис. 3.1 с, при переходах и замене рецептуры слоя.

Поэтому интерес представляет провести сравнительный анализ типичных конструкций кольцевых распределительных каналов рис. 3.2.

Для проведения исследований была разработана двухмерная модель канала. Модель построена по методу электрогидравлических аналогий, где выделенные участки головки представляются как сопротивление, и производится поэтапный расчет противодавления и скорости течения начиная от эквивалентного сопротивления копильника до выходного сопротивления в конце канала. В качестве закона описывающего течение расплава принят степенной закон. Канал копильника разбивается на 100 элементарных трубных участков, формующий цилиндрический канал на 50 элементарных участков типа плоская щель. Поскольку копильник может иметь различную форму поперечного сечения (трапеция, круг, прямоугольник), которая влияет на время прохождения расплава, в модели предусмотрена возможность расчета скорости течения в различных точках поперечного сечения копильника. Адекватность модели подтверждена при экспериментальном изучении работы распределительных каналов с различными полимерными материалами [68, 69, 70].

Входными данными для модели являются следующие технологические параметры: реологическая характеристика полимера в виде степенной модели, производительность 7,5кг/ч, конструктивные параметры канала (таблица 3.1).

Для математического исследования процессов течения расплава полимера были выбраны четыре конструкции распределительного канала (рис. 3.2):

1. Копильник постоянного диаметра расположен вдоль линии вхождения потока (адаптера экструдера) и не имеет наклона (простой, линейный).
2. Копильник имеет наклон относительно линии адаптера экструдера, постоянный диаметр, высота щелевого канала изменяется линейно (простой, линейный).
3. Копильник имеет наклон, переменный диаметр изменяющийся линейно, высота щелевого канала изменяется так же линейно (сложный, линейный).
4. Копильник имеет наклон и переменный диаметр, высота щелевого канала и диаметр изменяются нелинейно (сложный, нелинейный).

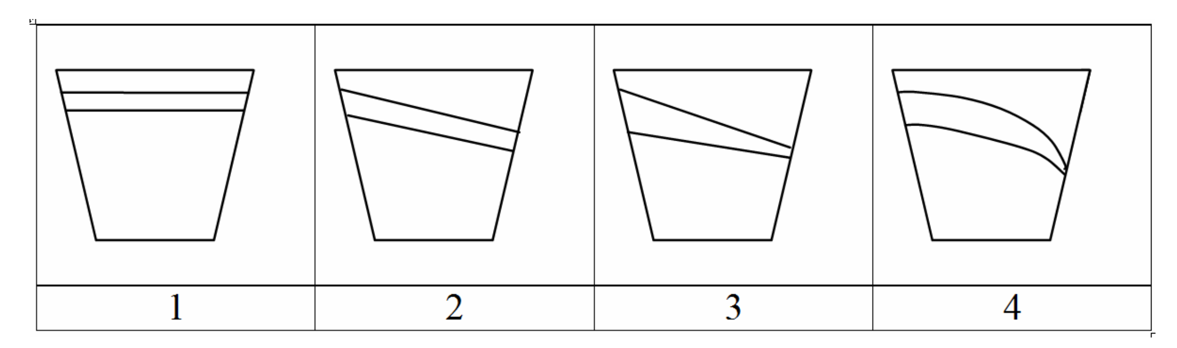


Рис. 3.2. Исследуемые распределительные каналы

Модель позволяет рассчитать: профиль скоростей на выходе из канала, распределение давления во всех точках канала, распределение скоростей и напряжений сдвига. Общая расчетная схема исследуемых распределительных каналов представлена на рис. 3.3. Конструктивные параметры, влияние которых учитывается в математической модели: диаметр копильника на входе и выходе, высота цилиндрического формующего канала на входе и выходе, ширина формующего зазора конического канала, диаметр конического распределителя канала на входе и выходе (таблица 3.1).

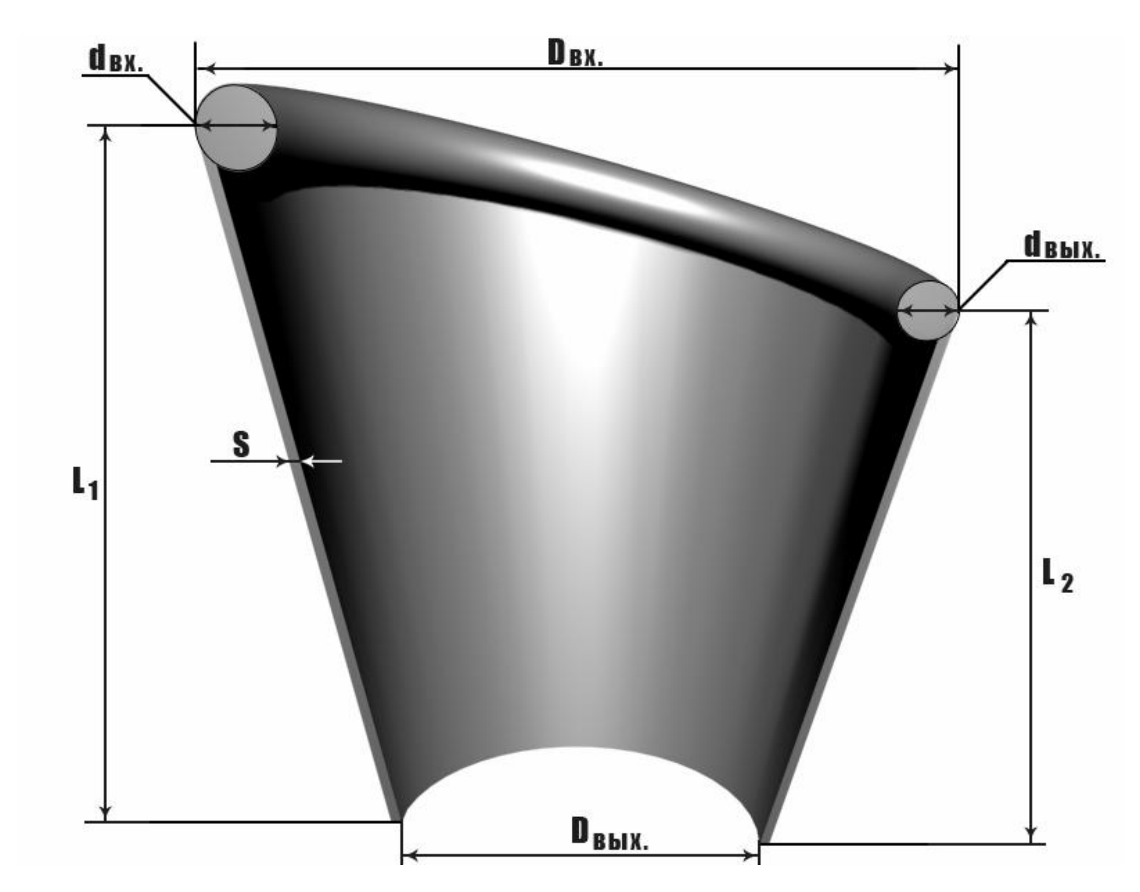


Рис. 3.3. Расчетная схема распределительного канала

Таблица 3.1

Геометрические параметры исследуемых каналов

№ п/п	Параметр	1	2	3	4
1	Диаметр копильника на входе dвх, мм	25	15	27,5	18
2	Диаметр копильника на выходе dвых, мм	25	15	6	6
3	Диаметр канала на входе Dвх, мм	190	190	190	190
4	Диаметр канала на выходе Dвых, мм	70	70	70	70
5	Зазор в коническом канале s, мм	2	2	2	2
6	Высота конического канала на входе L1, мм	178	178	178	178
7	Высота конического канала на выходе L2, мм	178	134	134	134

Выбор таких конструкций для проведения исследований обусловлен следующим: во-первых, необходимо понимание каким образом усложнение конструкции и соответственно удорожание головки повлияет на стабильность толщины слоя, во-вторых, такие конструкции применяются и в настоящее время особенно для термочувствительных полимеров, в-третьих, после анализа можно провести параллели с плоскощелевыми головками. Все конструкции

имеют одинаковое назначение – сформировать максимально равномерный по сечению поток расплава в виде рукава [71].

Вводились ограничения по противодавлению канала – 110-120Бар, так как суммарное противодавление для всей головки не должно превышать 350 Бар. Это связано с ограничением по противотоку в экструдере, так как канал должен быть пригоден для переработки термореактивных пластмасс, имеющих высокую термочувствительность. Высота и диаметр конуса (корпус головки) на входе и выходе не варьировался.

Оптимизация геометрических размеров для каждого варианта конструкции проводилась по двум параметрам:

- профиль скоростей потока расплава на выходе из канала, то есть проводилась минимизация отклонения от средней скорости;
- среднее время пребывания полимера в копильнике должно быть минимальным.

Каждая конструкция канала была оптимизирована под переработку двух видов полимеров (с разными индексами течения), путем подбора диаметра копильника на входе и выходе. Для проведения оптимизации использовался инструмент «Пакет анализа» Microsoft Excel. В качестве сравнительной оценки конструкции каналов приняты три параметра максимальный процент отклонения скорости от средней Smax [%], максимальное время пребывания полимера в головке Tmax [мин], уровень противодавления в канале Pnom [Бар]. Для сравнения, в качестве эталонного процента отклонения скорости от средней можно считать уровень 15%, фактически это означает, что толщина слоя будет лежать в диапазоне ±7,5% от средней толщины. Такое отклонение является нормой для многих известных производителей экструзионного оборудования. Таким образом критерием оптимальности является минимум суммы Kopt = Smax + Tmax → min.

Моделирование проведено для двух вариантов индекса течения 0,3 и 0,65. Такой диапазон охватывает большую номенклатуру пластмасс используемых в промышленности. В качестве исследуемых реологических характеристик

выбраны марки полимеров PVDC, температура переработки принята постоянной Тр=165°С. Реологические характеристики используемых полимеров следующие:

IXAN 303 $m = 28579 \cdot \gamma^{-0,7} \cdot e^{-0,01(T_p - 140)}$,

IXAN 813 $m = 9695 \cdot \gamma^{-0,35} \cdot e^{-0,01(T_p - 155)}$.

Результаты моделирования процесса течения полимера представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Результаты моделирования процесса течения в исследуемых каналах

Номер канала	1		2		3		4	
Индекс течения расплава	0,3	0,65	0,3	0,65	0,3	0,65	0,3	0,65
Максимальный процент отклонения скорости от средней	33	4,3	15	25	24,6	23	18,5	21,2
Максимальное время пребывания полимера в копильнике, рассчитанное по профилю скорости на расстоянии 1мм от стенки канала, мин	178	207	31	38	3,6	3	3	2,8
Диапазон изменения (min-max) скоростей сдвига в копильнике, 1/с	0,038-2,14		0,22-9,93		1,61-6,75		3,25-5,82	
Процент изменения скорости сдвига	5587		4365		319		79	
Противодавление канала, Бар	120	118	116	112	111	108	115	111

Математическое моделирование процессов течения полимера в исследуемых каналах позволило получить график распределения противодавления (рис. 3.4), график распределения производительности на выходе из исследуемых каналов (рис. 3.5), график распределения скорости сдвига по копильнику (рис. 3.6). График времени течения не приведен, так как является обратным по отношению к графику распределения скоростей сдвига.

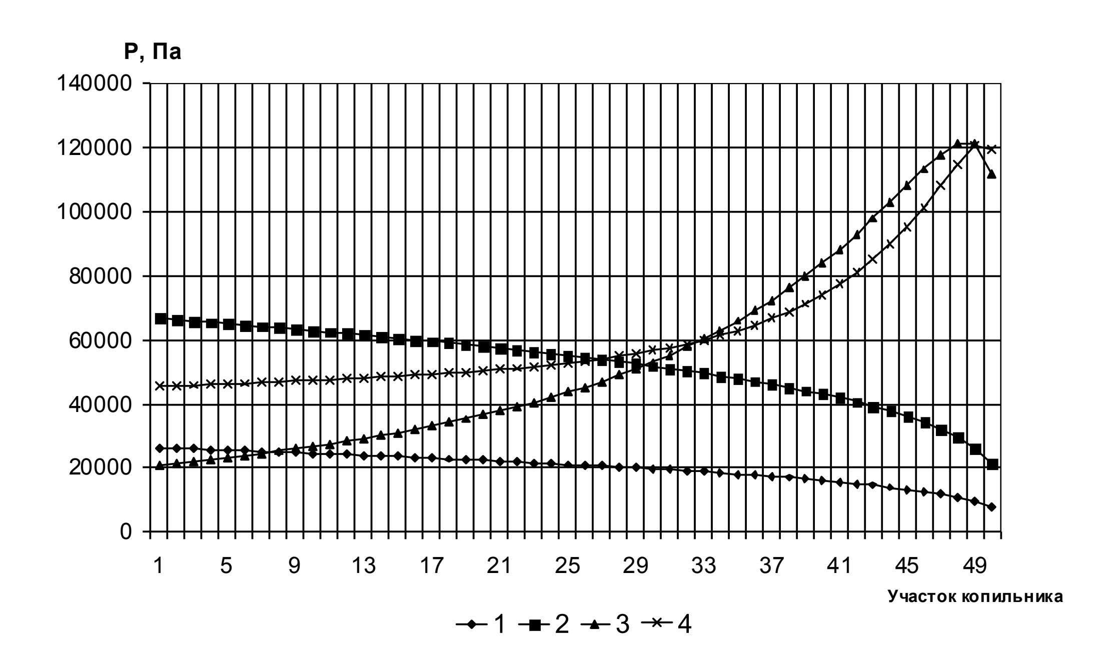


Рис. 3.4. Распределение давления по копильнику исследуемых каналов

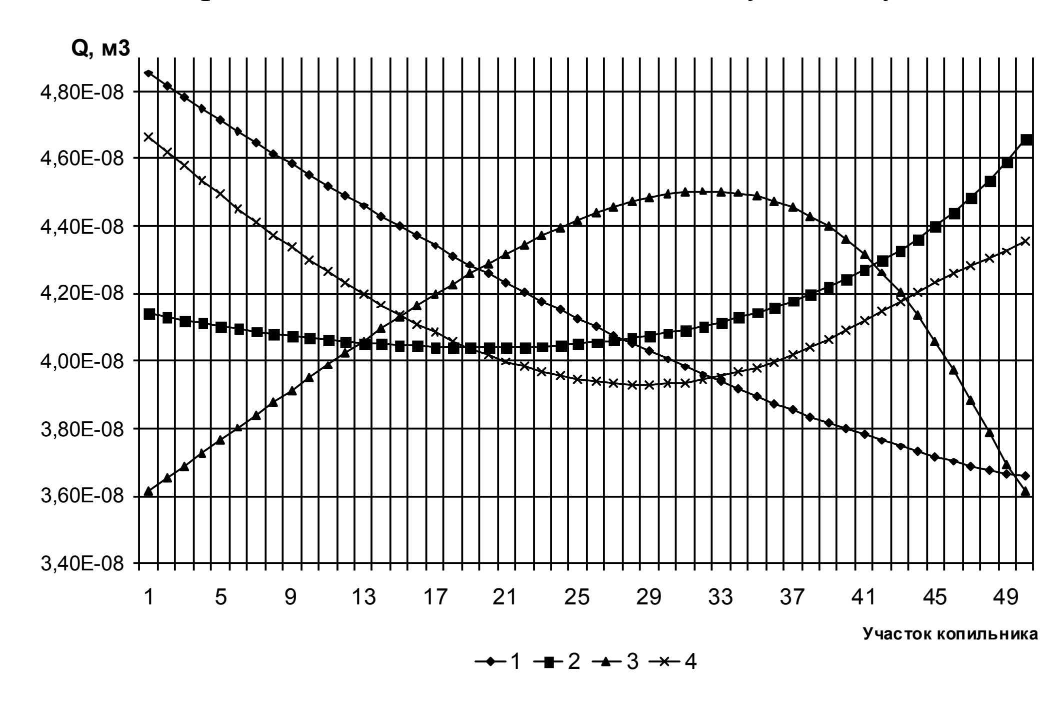


Рис. 3.5. Распределение производительности на выходе исследуемых каналов

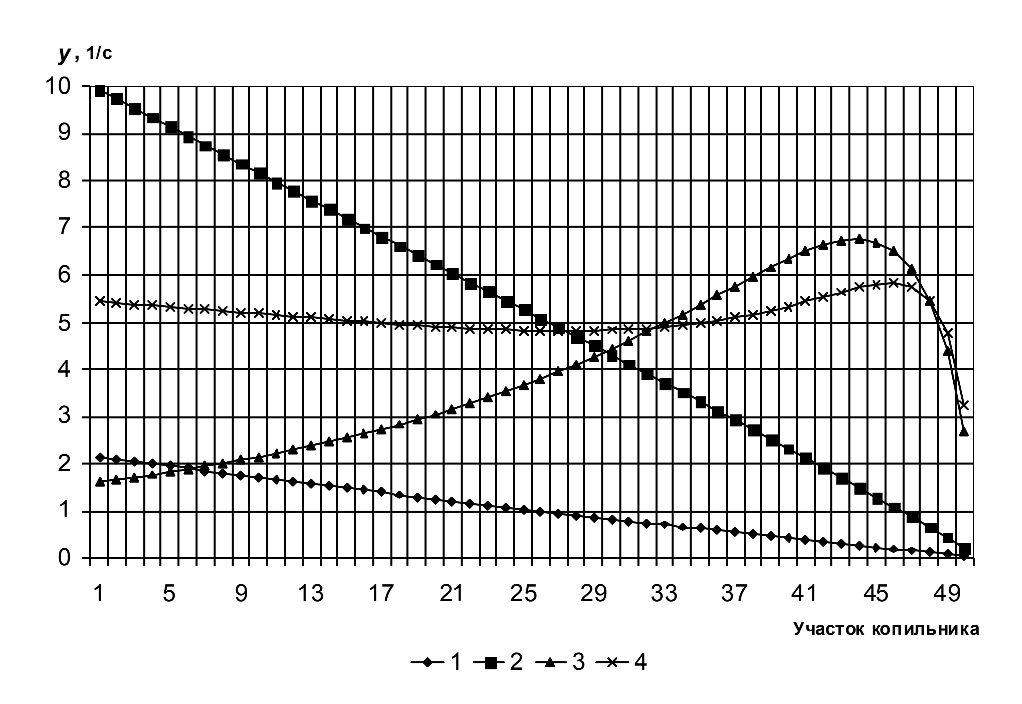


Рис. 3.6. Распределение скорости сдвига по копильнику исследуемых каналов

Анализ полученных графиков позволяет сделать вывод, что все конструкции копильников могут применяться в процессах переработки пластмасс, то есть «имеют право на жизнь». Конструкция канала №1 может применяться только для пластмасс с низкой термочувствительностью и для небольшого диапазона индексов течения. Применение канала №2 позволяет на порядок снизить максимальное время пребывания в копильнике, и является более универсальной. Конструкции канала №3 и канала №4 можно считать равнозначными и по универсальности и по времени пребывания полимера. Такие конструкции снижают противодавление распределительного канала, что важно для снижения противотока в экструдере и улучшения переработки термочувствительных полимеров.

Анализ графиков распределения производительности на выходе из распределительного канала (рис. 3.5) показал, что конструкция канала №2 и канала №4 обеспечивает повышение производительности на выходе из копильника, что уменьшает вероятность образования застойной зоны в точке слияния двух потоков расплава. Конструкция канала №3 наиболее неоднозначная, с одной стороны, обеспечивается небольшое время пребывания

полимера в канале, конструкция не является сложной в изготовлении, и характер распределения скоростей сдвига близок к каналу №4, с другой стороны, наблюдается резкое падение скорости течения к выходу из копильника, что может привести к образованию застойной зоны и длительному вымыванию расплава при переходах по цвету и рецепту. Наиболее оптимальной является конструкция канала №4, применение которой обеспечивает универсальность по отношению к переработке различных пластмасс и минимальное время пребывания расплава в головке.

Исследуемые распределительные каналы значительно различаются по отклонению скорости сдвига в копильнике. Результаты моделирования показали, что постоянство скорости сдвига в копильнике является интегральным критерием оценки качества работы канала (рис. 3.6). Конструкция канала №4 наиболее отвечает этому требованию.

Одним из критериев рациональной конструкции (для выбранных материалов и производительности) является обеспечение уровня скоростей сдвига в копильнике более $1{,}6 с^{-1}$, в этом случае расчетное время пребывания полимера в канале головки составляет не более 3мин, что важно для разрабатываемой проблемы ускорения переходов.

3.2 Оптимизация характеристик кольцевого распределительного канала экструзионной головки.

В предыдущей главе было показано, что распределительный канал с постоянным диаметром копильника (см рис. 3.2), имеющий относительно несложную конфигурацию, обеспечивает разнотолщинность ±7,5%. Такой уровень разнотолщинности слоя приемлем и для многих современных процессов производства пленочных материалов.

Срок службы экструзионных головок составляет более 20лет. В то же время чистка проводится в зависимости от термостабильности полимерного материала с периодичностью от 3 до 24 месяцев. Операция чистки достаточно трудоемкая и связана повышенным термическим и механическим воздействием

на поверхность головки, что естественно постепенно меняет геометрию и твердость поверхности.

Поэтому представляет интерес определить:

1. Как изменение отдельных конструктивных параметров рассматриваемого канала и технологические характеристики переработки повлияют на разнотолщинность.
2. Разработать практические рекомендации по анализу и поиску причин отклонений в толщине пленки.
3. Определить критический уровень изменения геометрии канала, когда требуется замена головки. Также важно определить взаимосвязь конструктивных и технологических параметров формующего оборудования в процессе экструзии с качественными характеристиками продукции.

На примере исследования канала, где копильник имеет наклон относительно линии адаптера экструдера, постоянный диаметр, высота щелевого канала изменяется линейно (рис. 3.7).

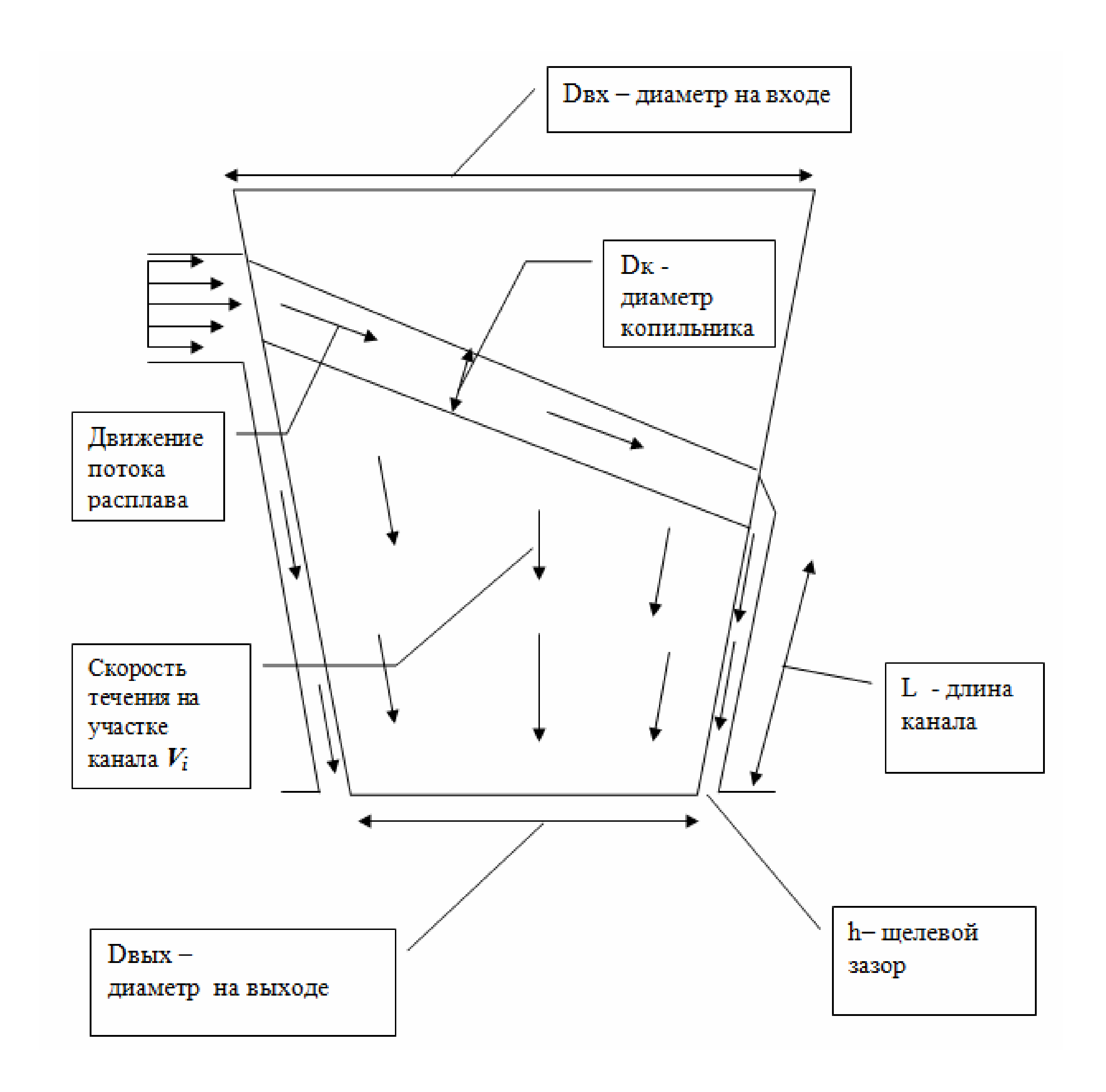


Рис. 3.7. Расчетная схема распределительного канала. L, h, Dк, Dвых - переменные для исследования влияния на стабильность скорости . Моделируемый участок №1 соответствует D вход, моделируемый участок №50 соответствует Dвых

Моделирование, при исследовании влияния конструктивных параметров, проведено для материала с индексом течения 0,3. Такой диапазон охватывает большую номенклатуру пластмасс используемых в промышленности. В качестве исследуемой реологической характеристики выбрана марка полимера PVDC - IXAN 303, температура переработки принята постоянной tp=165°C Производительность 7,6 кг/час.

Реологическая характеристика: $m=28579\ \gamma^{-0,7} \exp\{-0,01(tp-140)\}$.

В качестве критерия для оценки работы канала принят процент отклонения скорости: $\Delta Vi = (Vimax-Vi\ min)/Vimax*100\%$.

Разнотолщинность пленки прямо пропорциональна проценту отклонения скорости. Стандартным можно считать отклонение скорости не более 15%.

3.2.1 Анализ влияние конструктивных параметров

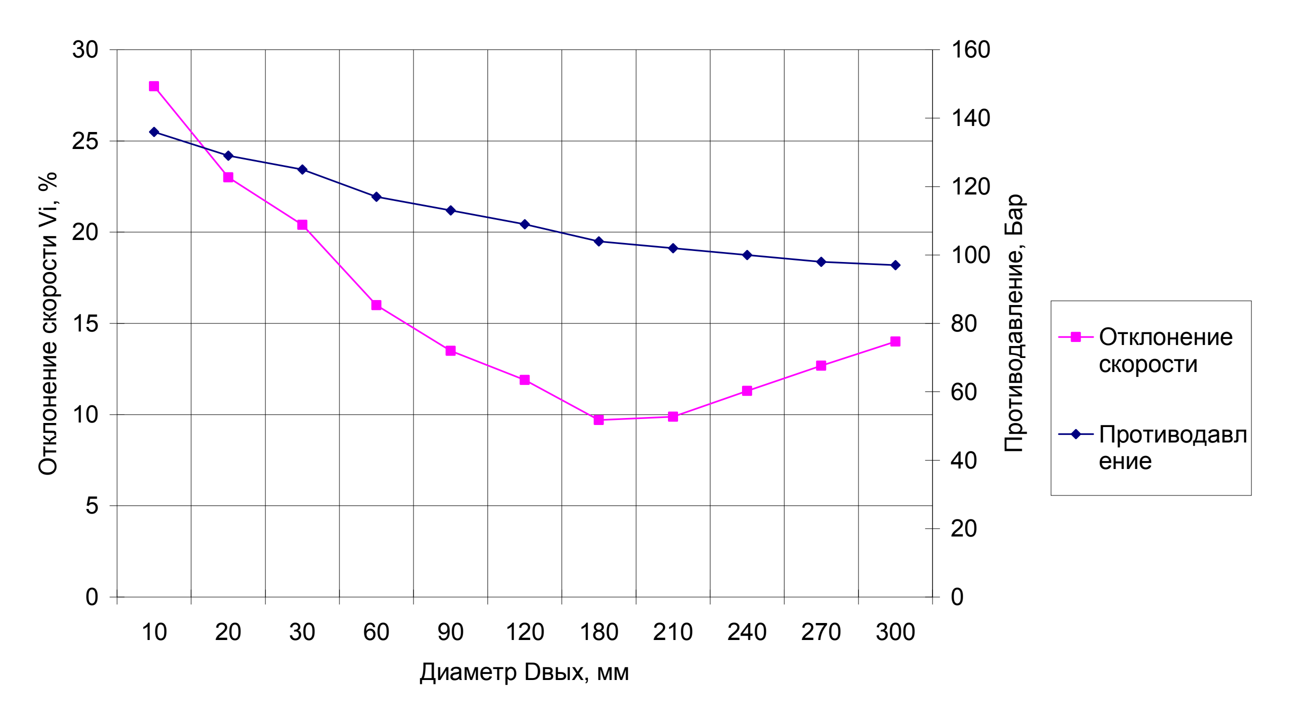


Рис. 3.8. Влияние диаметра распределительного канала на выходе, в точке слияния слоев на технологические параметры экструзии

Влияние диаметра копильника на выходе из головки Dвых (рис. 3.8). Влияние незначительное, при стандартных конструктивных решениях, когда угол наклона канала в диапазоне -30° +30° . Важным является то, что

существует оптимальное значение для данного параметра, в рассматриваемом примере это Dвых = 180мм когда угол наклона 2 градуса.

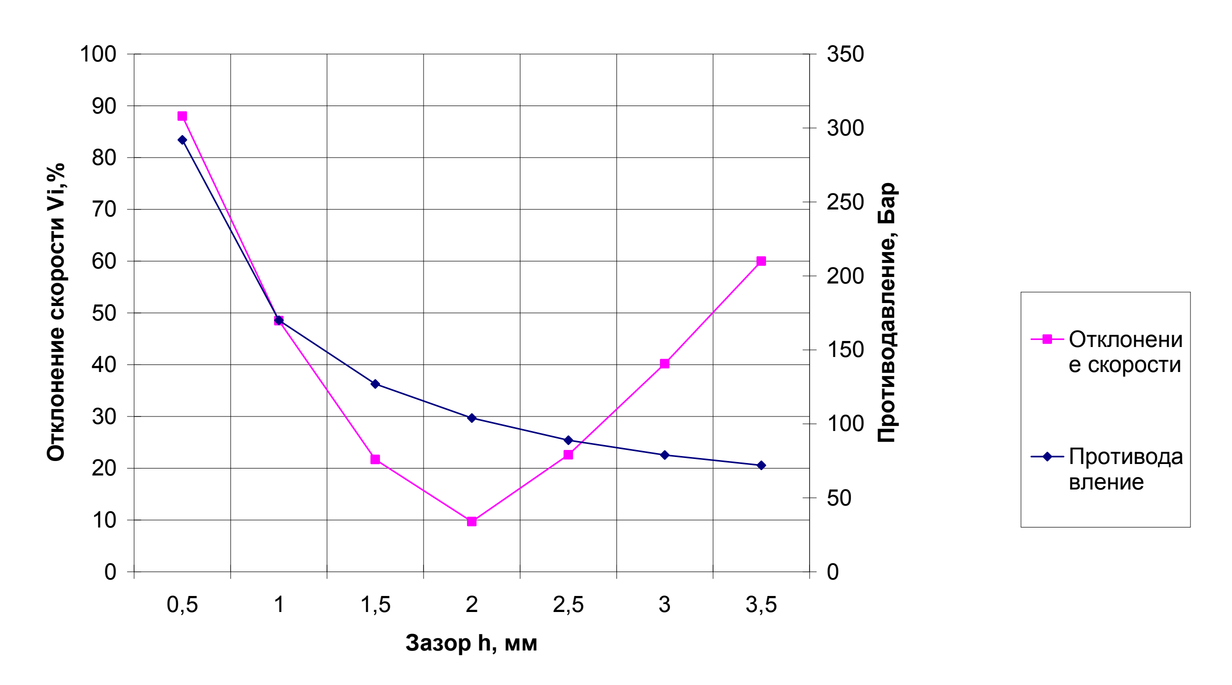


Рис. 3.9. Влияние формующего зазора на распределение слоя

Влияние щелевого зазора h (рис. 3.9). В данном исследовании зазор изменялся в диапазоне 0,5мм до 3,5мм. Оптимальное значение 2мм (для копильника диаметром Dк=15мм). Наиболее важный фактор с точки зрения влияния на отклонение скорости. При изменении зазора на 5% (с 2мм до 2,1мм) отклонение скорости изменяется на 49% (с 9,56% до 14,2%). Для однослойных головок щелевой зазор рассчитывается исходя из требуемого противодавления, и максимального напряжения сдвига. При конструировании соэкструзионных головок необходимо также учитывать толщину каждого слоя и последовательность наложения слоев во избежание образования застойных зон и нестабильной толщины слоев при их наложении.

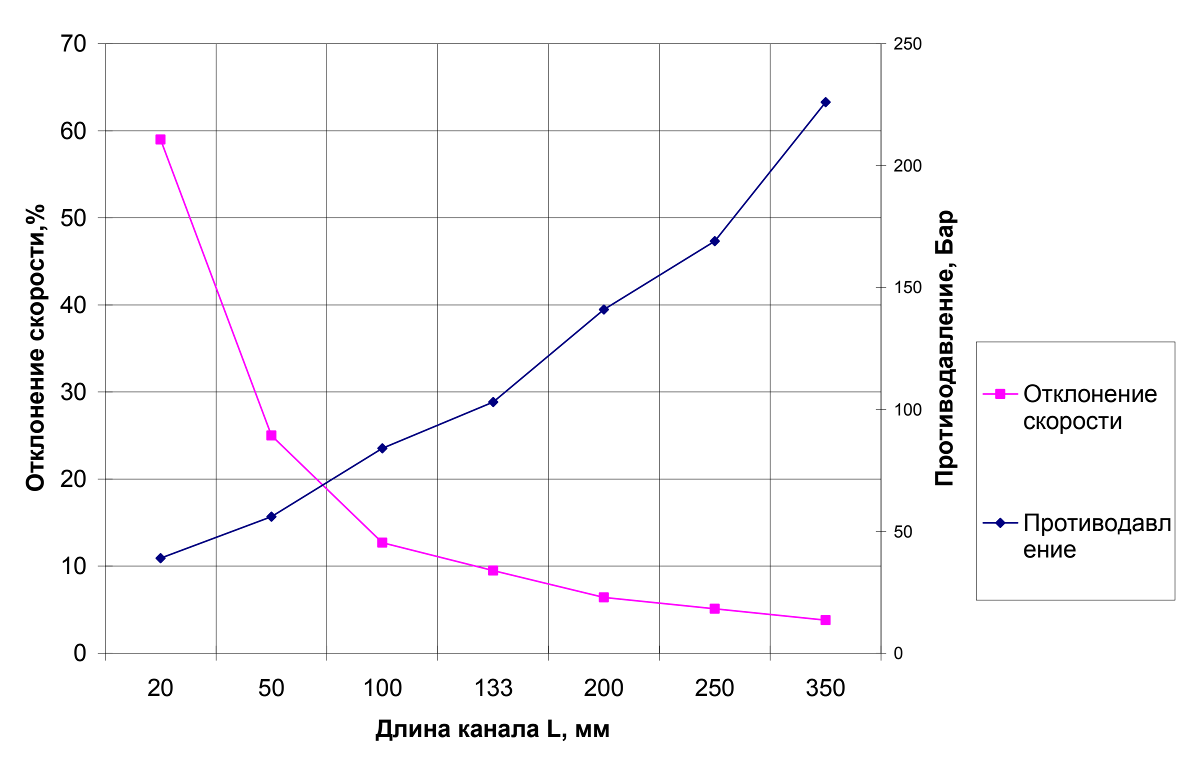


Рис. 3.10. Влияние длины канала распределителя на технологические параметры экструзии слоя

Влияние длины канала L. Стандартное конструктивное решение лежит в диапазоне 100-150мм. В данном исследовании такой диапазон подтверждается. Непонятно почему увеличение длины канала снижает отклонение скорости ΔV. То есть почему для ширины зазора h существует оптимальное противодавление, а для длины канала L чем выше противодавление тем лучше распределение. Вероятно при увеличении длины канала возникают поперечные течения за счет выравнивания напряжений сдвига в поперечном сечении канала, в то же время при уменьшении зазора выравнивание скоростей не успевает реализоваться. Увеличение длины канала ограничивается максимальным противодавлением 450 Бар, выше данного значения появляются критические напряжения сдвига и может произойти нарушение герметичности соединений экструдера.

3.2.2 Анализ влияния технологических параметров

В работе [43] приводятся результаты моделирования течения для плоскощелевой головки. Показано, что изменение производительности,

температуры переработки оказывает незначительное влияние на исходное распределение скоростей на выходе из головки (скорость течения отклоняется на 5% при изменении производительность в 10 раз). В то же время изменение материала с PS на LDPE приводит к резкому отклонению скорости на 100%, на практике это означает, что толщина по сечению пленки будет различаться в два раза, такое отклонение недопустимо.

В данном исследовании результаты изложенные в [43] подтверждаются. Варьирование температуры переработки и производительности не приводит к изменению распределения скоростей.

Из характеристик материла, влияние оказывает только индекс течения. Константа вязкости, температура плавления, температурная константа не влияют на распределение скорости. Причем существует оптимальное значение индекса течения 0,3 и область рациональных значений от 0,25 до 0,5, где отклонение скорости не превышает 15% .

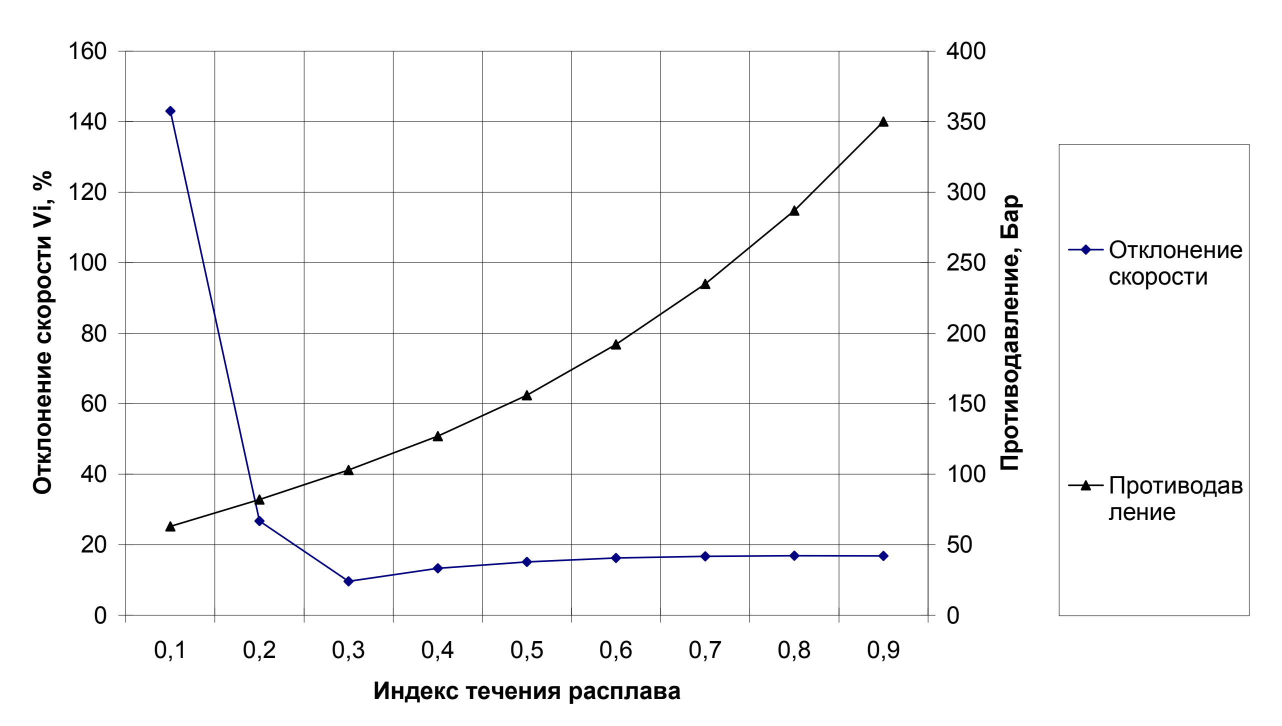


Рис. 3.11. Влияние индекса течения на технологические характеристики экструзии слоя

Следует отметить, что использованный в моделировании степенной закон течения дает следующую погрешность: индекс течения принимается

постоянным для всего исследуемого диапазона скоростей и температур переработки, в реальном процессе индекс течения зависит и от температуры и от скорости сдвига [38].

Взаимосвязь между индексом течения, температурой и скоростью сдвига представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Индекс течения расплава n и константа вязкости μ_0 ПЭВД 15813-020

Температура, °С	Скорость сдвига на участках течения, $с^{-1}$							
	20-40		40-100		100-200		200-700	
	n	μ_0	n	M_0	n	μ_0	n	μ_0
170	0,39	31289	0,30	43192	0,28	48645	0,20	74193
190	0,59	12346	0,43	22057	0,42	22827	0,27	50952
210	0,66	7173	0,56	10403	0,49	14535	0,37	27493
230	0,68	5443	0,61	6991	0,57	8374	0,40	21181

Поэтому управлением температурами и производительностью не следует пренебрегать, поскольку они незначительно, но влияют на индекс течения и в некоторых случаях это единственно возможный инструмент технолога.

Обычно в отработанной технологии такое варьирование очень ограничено, в том числе и инерционностью процесса, чтобы изменить и стабилизировать температуру в соэкструзионной головке на 10^0С требуется от 30мин до 120мин. Варьирование температурой по зонам экструдера более предпочтительно.

В качестве общей рекомендации может быть предложено повышение температуры и/или снижение производительности поскольку это повышает индекс течения и улучшает распределение.

3.3 Разработка модели пробкового течения расплава

Рассмотрим следующий механизм (модель) течения неньютоновской жидкости. Прежде всего, поскольку полимерные цепи находятся во взаимном зацеплении, в установившемся режиме всегда развивается «пробковый»

характер течения. То есть взаимоспутанность макромолекул блокирует развитие плавной эпюры скоростей от нуля на стенке канала до максимума в центре и эпюра имеет телескопический характер. Во всяком случае, это касается размеров каналов современного экструзионного оборудования и реометров [72].

При течении полимера формируется пристенный слой W3, молекулы которого сжаты и практически не релаксируют, и центральный слой W1 (пробка), который скользит по пристенному слою. Центральный слой сжимаем и обладает упругостью. Толщина пристенного слоя составляет 0,5-1 % от ширины канала. Взаимодействие происходит по макронеровностям и сегментам молекул которые выступают из спутанного клубка и адгезируют с молекулами пристенного слоя. Участок, где происходит взаимодействие, можно назвать низковязким межслоем W2, его толщина составляет от 1% до 8% от ширины канала (согласно исследований распределения слоев при соэкструзии см. Раздел №4).

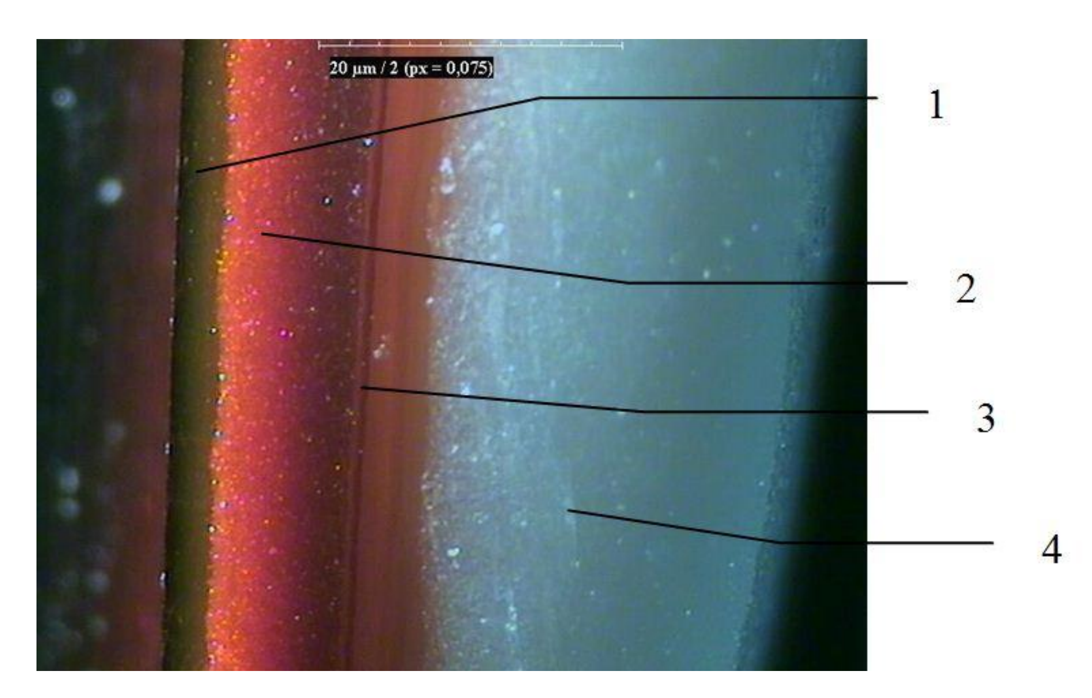


Рис. 3.12. Фотография среза пристенной области течения. Пристенная область (оттенки черного и темно коричневого цвета) состоит из трех областей: 1 – область контакта расплава с дюзой, пристенный слой, 2 – область низковязкого расплава, 3 – область расплава с нормальной вязкостью и цветом,

центральный, 4 – промывочный компаунд белого цвета, подан в головку для замены расплава коричневого цвета.

Макронеровности (пучки, сгустки молекул) характеризуются высотой H и углом наклона α. Микронеровности – выступающие сегменты молекул, в данной модели не учитываются, но предполагается их наличие и влияние на параметры течения. Схема течения представлена на рис. 3.14.

Взаимодействие и течение происходит следующим образом

1. Ньютоновская область высокой вязкости – скорость движения V_t небольшая и макронеровности и сегменты молекул центрального слоя успевают почти полностью релаксировать, межмолекулярная связь полностью восстанавливается, поэтому нет заметного снижения вязкости

2. Неньютоновская область, когда скорость релаксации V_r и скорость течения V_t близки, то есть макронеровности не успевают релаксировать, но уже передвинулись на новый выступ, здесь заметно уменьшается **μ** - длина линии, где соприкасаются молекулы центрального и пристенного слоев, поэтому наблюдается снижение вязкости.

3. Ньютоновская область низкой вязкости – скорость движения увеличивается настолько что молекулы не успевают релаксировать и войти в зацепление то есть взаимодействие происходит как бы по верхней части макронеровности, таким образом вязкость стабилизируется.

Собственно структуру поверхности расплава, то есть геометрию взаимодействующих макронеровностей, можно видеть на выходе из головки, поскольку прямоугольный профиль скоростей сохраняется при выходе расплава из формующего канала.

Участок, где происходит взаимодействие, можно назвать низковязким межслоем W2 (рис.3.13).

На рис. 3.13 представлены эпюры скоростей, общепринятой, рассчитанной согласно степенного закона и предлагаемой телескопической, где течение

происходит со скольжением на стенке канала, с различной толщиной низковязкого слоя W2 (производительность трех потоков одинакова). На рис. 3.14 приведена расчетная схема модели «пробкового» течения неньютоновской жидкости.

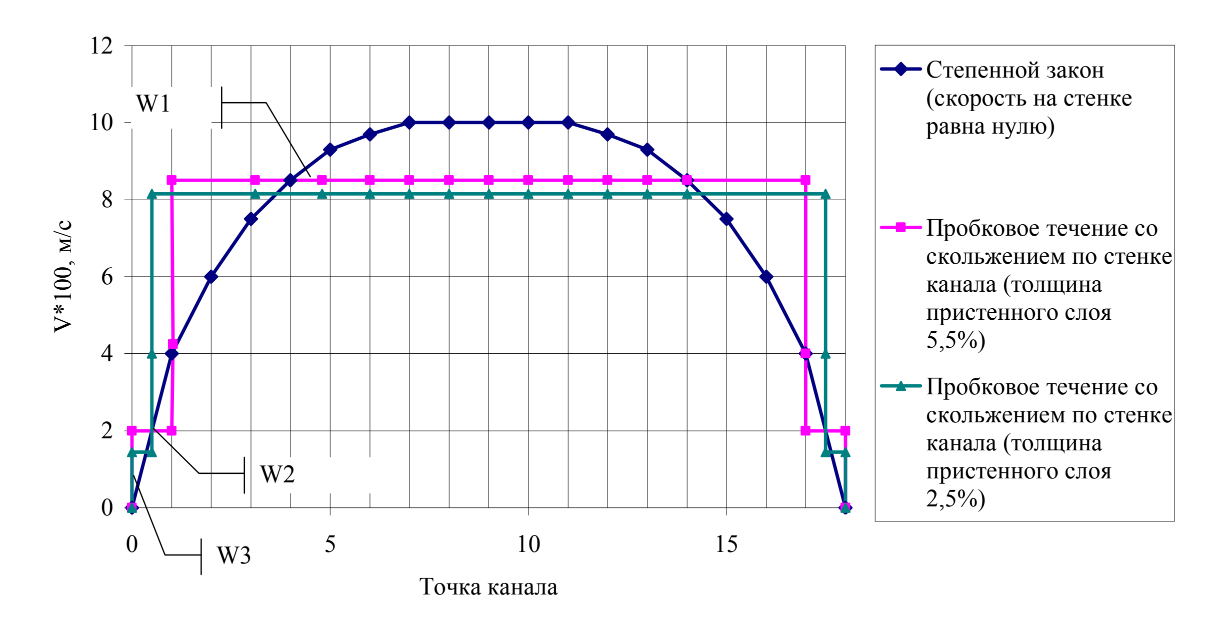


Рис. 3.13. Эпюры скоростей течения расплавов полимеров.

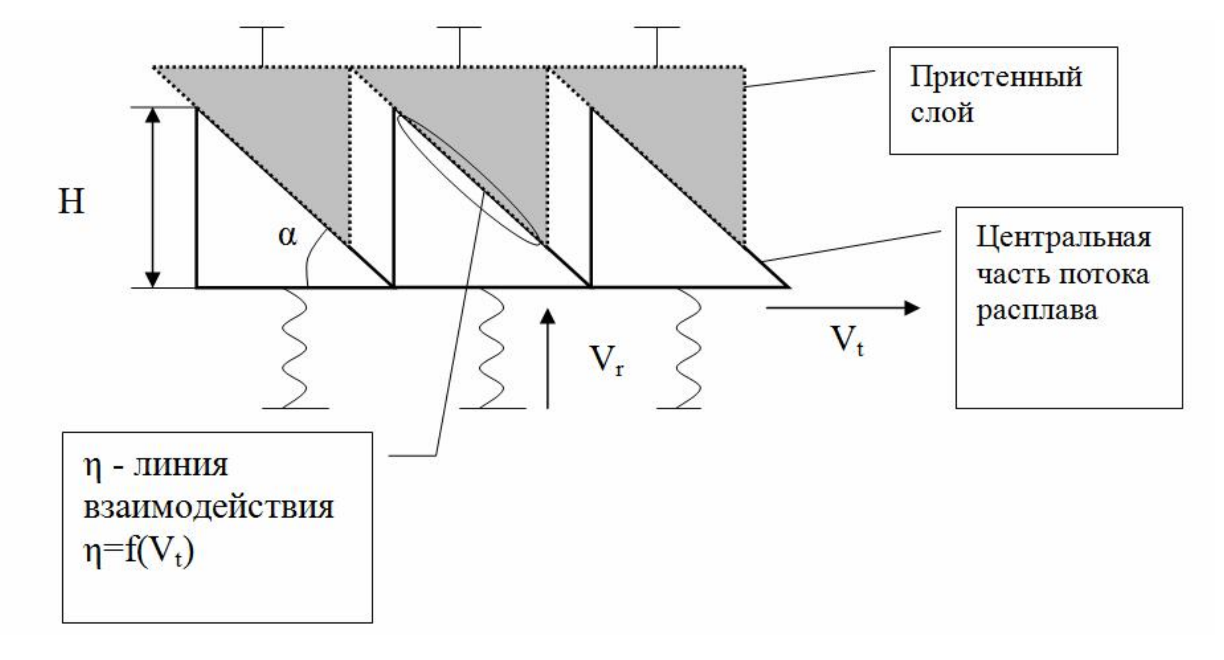


Рис. 3.14. Графическая интерпретация модели «пробкового» течения сжимаемой жидкости.

В результате анализа движения центрального слоя получено уравнение

$$\eta = \frac{H}{\sin\alpha} - \frac{H}{\dfrac{V_r}{V_t * tg\alpha} + 1}. \qquad (3.1)$$

Следует отметить, что при переходе от плоской модели к объемному течению параметр **η** можно рассматривать как вязкость.

Другими словами «пробковая» модель течения формулируется следующим образом: в канале течет (движется) центральный слой (пробка) W1, который взаимодействует с пристенным слоем W3 через низковязкий межслой W2. Пристенный слой W3 также движется по стенке канала, поскольку молекулярные цепи пристенного слоя и межслоя постоянно взаимодействуют в узлах зацеплениях и центральный слой W1 как бы «вытягивает» пристенный слой к выходу из канала.

3.3.1 Анализ результатов, характерные точки и аналогии

Итак, впервые получено уравнение полной реологической кривой неньютоновской жидкости на основе физической модели без эмпирических степенных зависимостей.

Уравнение (3.1) позволяет рассчитать константы вязкости и точки перехода между областями течения:

при низких скоростях сдвига $\eta_0 = \dfrac{H}{\sin\alpha}$; $V_{t1} = \dfrac{V_r}{tg\alpha}$;

при высоких скоростях сдвига $\eta_\infty = \dfrac{H}{\sin\alpha} - H$; $V_{t2} = \dfrac{V_r}{tg\alpha * \left[\dfrac{1}{\sin\alpha} - 1\right]}$.

При угле α≈0 моделируется ньютоновское течение, то есть реализуется сдвиг слоев без релаксации.

Можно провести аналогию предлагаемой модели с турбулентным течением жидкости, макронеровности в пристенной области являются поперечными вихреобразованиями проникающими в центральную часть турбулентного потока жидкости, угол α и высота Н по сути характеристики вихря.

Понимание вязкости неньютоновской жидкости в модели «пробкового» течения отличается от общепринятого: высокая вязкость наблюдается по причине большой площади взаимодействия. Наблюдаемое снижение вязкости это уменьшение, сглаживание выступов, уплотнение расплава и уменьшение эффективной площади контакта.

Модель предполагает, что вязкость неразрывно связана с эффективной площадью взаимодействия. Также модель связывает релаксацию напряжений в полимере с характеристиками течения.

3.3.2 Метод расчета каналов формующего оборудования на основе модели пробкового течения

В таблицах 3.4 и 3.5 даны сравнительные параметры модели с общепринятым подходом, приведены формулы для пересчета параметров течения в каналах характерной геометрии.

Таблица 3.4

Уравнения течения жидкости для капилляра (трубный канал) длиной *L* и радиусом *R*

Общепринятый подход, ньютоновская жидкость		Модель «пробкового» течения неньютоновской жидкости		Взаимосвязь параметров для капилляра (трубный канал)
Вязкость (эффективная вязкость для полимеров)	μ, [Па*с]	Пристенная вязкость	η, $\left[\frac{Па*с}{м}\right]$	$\eta = \frac{4\mu}{R}$
Скорость сдвига (кажущаяся или эффективная или средняя скорость сдвига для полимеров)	γ, $\left[\frac{1}{c}\right]$ $\gamma = \frac{4Q}{\pi R^3}$	Скорость течения «пробки» расплава	V_t, $\left[\frac{м}{c}\right]$ $V_t = \frac{Q}{\pi R^2}$	$V_t = \frac{\gamma * R}{4}$
Противодавление из за сдвигового течения жидкости	ΔP_n, [Па] $\Delta P_n = \frac{Q\mu 8L}{\pi R^4}$	Противодавление из-за прилипания (адгезии) «пробки» расплава к стенкам канала	ΔP_c, [Па] $\Delta P_c = \frac{Q\eta 2L}{\pi R^3}$	$\frac{\Delta P_n}{\Delta P_c} = \frac{4\mu}{R\eta} = 1$ $\Delta P_n = \Delta P_c$
Напряжение сдвига	τ_n, [Па] $\tau_n = \frac{\Delta P_n R}{2L}$ $\tau_n = \mu\gamma$	Напряжение сдвига	τ_c, [Па] $\tau_c = \frac{\Delta P_c R}{2L}$ $\tau_c = \eta V_t$	$\tau_n = \tau_c$

Таблица 3.5

Уравнения течения жидкости между параллельными пластинами длиной L шириной w и высотой h

Общепринятый подход, ньютоновская жидкость		Модель «пробкового» течения неньютоновской жидкости		Взаимосвязь параметров
Вязкость (эффективная вязкость для полимеров)	μ, [Па*с]	Пристенная вязкость	η, $\left[\frac{Па*с}{м}\right]$	$\eta = \frac{6\mu}{h}$
Скорость сдвига (кажущаяся или эффективная или средняя скорость сдвига для полимеров)	γ, $\left[\frac{1}{c}\right]$ $\gamma = \frac{6Q}{wh^2}$	Скорость течения «пробки» расплава	V_t, $\left[\frac{м}{c}\right]$ $V_t = \frac{Q}{wh}$	$V_t = \frac{\gamma h}{6}$
Противодавление из-за сдвигового течения жидкости	ΔP_n, [Па] $\Delta P_n = \frac{Q\mu 12L}{wh^3}$	Противодавление из-за прилипания расплава к стенкам канала	ΔP_c, [Па] $\Delta P_c = \frac{Q\eta 2L}{wh^2}$	$\frac{\Delta P_n}{\Delta P_c} = \frac{6\mu}{h\eta} = 1$ $\Delta P_n = \Delta P_c$
Напряжение сдвига	τ_n, [Па] $\tau_n = \frac{\Delta P_n h}{2L}$ $\tau_n = \mu\gamma$	Напряжение сдвига	τ_c, [Па] $\tau_c = \frac{\Delta P_c h}{2L}$ $\tau_c = \eta V_t$	$\tau_n = \tau_c$

В модели пробкового течения противодавление определяется силой вязкого трения F_t которая развивается в межфазном слое W2 то есть между стенками (поверхностью) канала и пробкой расплава, поэтому основные соотношения при движении расплава полимера в каналах характерной геометрии рассчитываются следующим образом:

трубный канал: $\Delta P = \frac{F_t}{S_c} = \frac{V_t \eta S_p}{S_c} = \frac{V_t \eta 2\pi RL}{\pi R^2} = \frac{V_t \eta 2L}{R} = \frac{Q\eta 2L}{\pi R^3}$, (3.2)

щелевой канал: $\Delta P = \frac{F_t}{S_c} = \frac{V_t \eta S_p}{S_c} = \frac{V_t \eta 2wL}{wh} = \frac{V_t \eta 2L}{h} = \frac{Q\eta 2L}{wh^2}$, (3.3)

где S_c – площадь сечения канала; S_p – площадь поверхности канала; F_t – сила препятствующая сдвигу «пробки» расплава, характеризующая прилипание (адгезию) расплава к стенкам канала.

Проведем анализ размерности пристенной вязкости:

$$\left[\frac{Па*с}{м}\right]=\frac{[давление]}{[скорость]}=\frac{[сила]}{[производительность]}. \qquad (3.4)$$

В таком понимании вязкость, как величина показывающая сопротивление течению, имеет выраженный физический смысл.

3.3.3 Сравнительный анализ полных реологических моделей течения расплава полимера

Определим погрешность прогнозирования вязкости с помощью модели пробкового течения в максимально широком диапазоне скоростей сдвига.

Реологические кривые HDPE (200°C, Алатон TM7040) и PP (190°C, CD460) в диапазоне скоростей сдвига γ от 10^{-2} до 10^{4} взяты из [34].

Модель Carreau выбрана для сравнительного анализа:

$$\frac{\mu-\mu_\infty}{\mu_0-\mu_\infty}=\left(1+(\lambda\gamma)^2\right)^{\frac{n-1}{2}}. \ (3.5)$$

Параметры модели Carreau, для выбранных марок HDPE и PP, приведены в [34], но для охвата всего диапазона скоростей сдвига (γ от 10^{-2} до 10^{6}) и повышения точности аппроксимации, параметры модели Carreau скорректированы, вычисления проведены с применением пакета поиск решения Excel.

Модель Levanicheva:

В модели предусматривается «пробковое» течение, но для наглядности аппроксимации двумя моделями вместо скорости течения V_t [м/с] применяется скорость сдвига γ [1/с] и обычное понимание вязкости как сопротивление сдвиговому течению:

$$\mu=\frac{H}{\sin\alpha}-\frac{H}{\frac{\gamma_r}{\gamma*tg\alpha}+1}. \ (3.6)$$

Поскольку применяется скорость сдвига, формулы расчета точек перехода между областями течения:

при низких скоростях сдвига $\mu_0 = \dfrac{H}{\sin\alpha}$; $\gamma_{t1} = \dfrac{\gamma_r}{tg\alpha}$;

при высоких скоростях сдвига $\mu_\infty = \dfrac{H}{\sin\alpha} - H$; $\gamma_{t2} = \dfrac{\gamma_r}{tg\alpha * \left[\dfrac{1}{\sin\alpha} - 1\right]}$.

Для определения параметров модели, задаваясь значениями μ_0 и μ_∞, находим угол α по уравнению:

$$\sin(\alpha) = 1 - \frac{\mu_\infty}{\mu_0}. \qquad (3.7)$$

Далее задаваясь значением γ_{t1}, рассчитываем скорость релаксации γ_r.

3.3.4 Результаты моделирования течения с помощью уравнения полной реологической кривой

Итоговые значения параметров моделей приведены в таблице 3.6. В таблице 3.7 приведены расчетные значение в каждой анализируемой точке реологической кривой. Также приведено среднеквадратичное отклонение σ прогнозирования вязкости с применением двух рассматриваемых моделей (количество точек n=6) [73].

Таблица 3.6

Параметры моделей течения

Параметр	Материал		Описание
	HDPE	PP	
α, град	82,1	85,6	Model Lev-va - параметры
γ_r, 1/с	2732	102	
H, Па*с	1040	5035	
γ_{t1}, 1/с	380	8	Model Lev-va - расчетные значения
γ_{t2}, 1/с	39520	2679	
μ_0, Па*с	1050	5050	
μ_∞, Па*с	10	15	
μ_0, Па*с	1100	4700	Model Carreau - параметры
μ_∞, Па*с	10	1	
n	0,3	0,39	
λ, с	0,01	0,51	

Таблица 3.7

Экспериментальные и расчетные значения вязкости по анализируемым моделям

Скорость сдвига	Вязкость, экспериментальные и расчетные значения для PP			Вязкость, экспериментальные и расчетные значения для HDPE		
γ, c^{-1}	μ эксп	Lev-v μ расч	Carreau μ расч	μ эксп	Lev-v μ расч	Carreau μ расч
1,0E-02	-	5044	4700	-	1050	1100
1,0E-01	5000	4988	4696	1000	1050	1100
1,0E+00	4000	4489	4380	1000	1047	1100
1,0E+01	2000	2250	1720	950	1023	1096
1,0E+02	500	387	428	900	833	865
1,0E+03	100	55	106	400	296	227
1,0E+04	21,6	19	27	50	48	53
1,0E+05	-	15	7	–	14	19
1,0E+06	-	15	3	–	10	12
Среднеквадратичное отклонение σ, Па*с		230	231	–	65	110

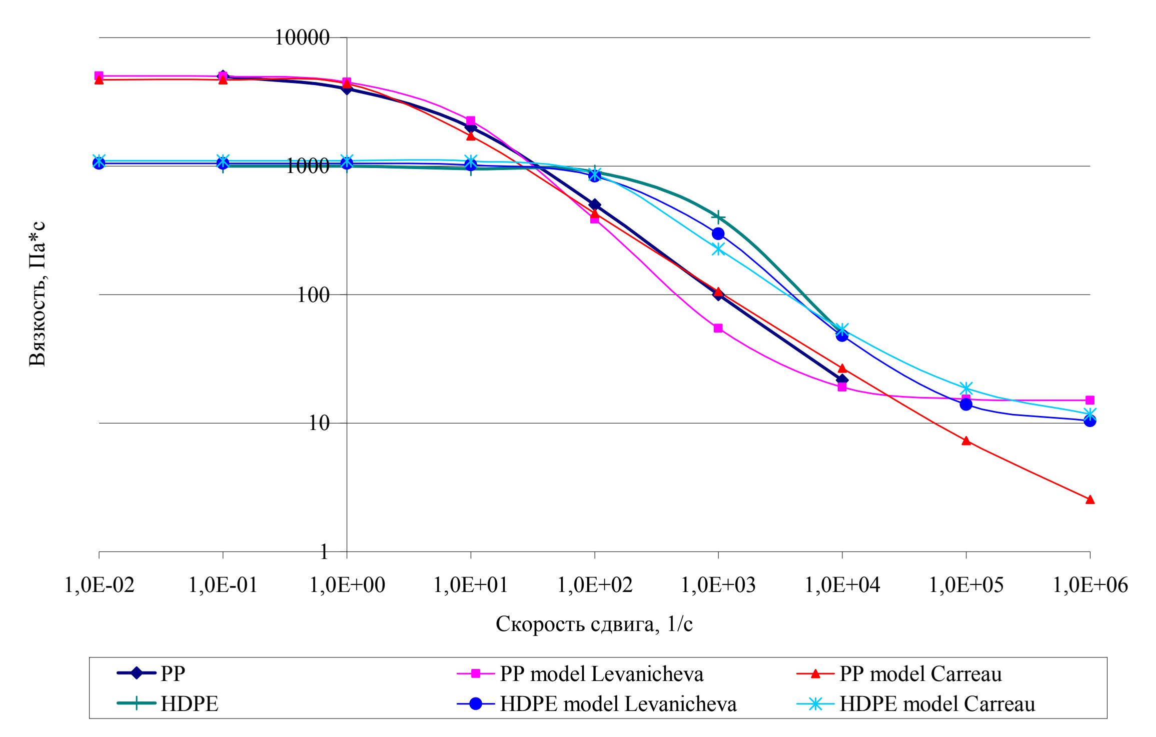


Рис. 3.15. Реологические характеристики HDPE и PP при различных температурах и аппроксимация уравнениями (3.5 и 3.6) с параметрами согласно табл. 3.6.

Отметим следующую взаимосвязь двух моделей. Во-первых, близкие значения предельных значений вязкостей μ_0 и μ_∞. Во-вторых, скорости релаксации γ_r в модели Lev-va обратно пропорциональны времени релаксации λ в модели Carreau, причем отношение скоростей γ_r для двух полимеров имеет одинаковый порядок с отношением времен релаксации λ.

Модель Lev-va имеет следующие преимущества:

- разработана на основе физической модели течения;
- дает меньшую погрешность;
- имеет меньше параметров;
- позволяет рассчитать точки перехода между областями течения и предельные значения вязкости;
- модель имеет универсальный характер, при угле $\alpha \approx 0$, моделируется ньютоновское течение, то есть сдвиг без релаксации;
- получаемая форма графика ближе к типичной S-образной форме кривой течения неньютоновской аномальной вязкой жидкости, которая приведена в [43, 74].

В таблице 3.8 приведены параметры модели Levanicheva для исследуемых реологических кривых, но в параметрах пристенной вязкости и пробковой скорости течения. Расчет константы вязкости H_c и скорости релаксации V_r проведен для стандартного капилляра (D=2,1 мм, L=8 мм) по уравнениям: $\eta=3810*\mu$; $V_t=\gamma/3810$.

Таблица 3.8

Параметры модели «пробкового» течения

Параметр		Model Levanicheva	
		HDPE	PP
Угол взаимодействия	α, град	82,1	85,6
Скорость релаксации	V_r м/с	0,719	0,027
Высота взаимодействующих элементов (константа пристенной вязкости)	H_c, Па*с/м	3,97E+06	1,92E+07
Вязкость при нулевой скорости течения	η_0, Па*с/м	4,01E+06	1,93E+07
Вязкость при бесконечной скорости течения	η_∞, Па*с/м	3,82E+04	5,73E+04
Скорость течения, переход при низких скоростях	V_{t1}, м/с	0,1	0,0021
Скорость течения, переход при высоких скоростях	V_{t2}, м/с	10,4	0,705

3.3.5 Моделирование течения при различных температурах, сравнительный анализ пробковой и степенной модели течения расплава

При разработке процессов переработки пластмасс требуется проведение анализа во всем диапазоне температур, где наблюдается вязкотекучее состояние, то есть должен охватывать возможный диапазон температурных режимов переработки полимера.

Степенной закон повсеместно применяется для расчета процессов течения расплава в экструдере и головке, но позволяет рассчитывать течение только на ограниченном участке кривой. Например для полимеров которые были рассмотрены в предыдущем разделе, охватывает область скоростей сдвига γ от 10^1 до $10^4 с^{-1}$ для PP, и от 10^2 до 10^4 для HDPE (рис. 3.15). Следует отметить, иногда указывается, что область скоростей сдвига, которые достаточно точно охватываются степенным законом, совпадает с характерной областью переработки полимеров от 10^0 до 10^4 [33], но при анализе конкретных характеристик, видно что переходная (линейная область в логарифмических координатах) значительно меньше.

Для реологических характеристик LDPE при двух температурах были рассчитаны параметры согласно модели пробкового течения (табл. 3.10) и степенной модели (рис. 3.16).

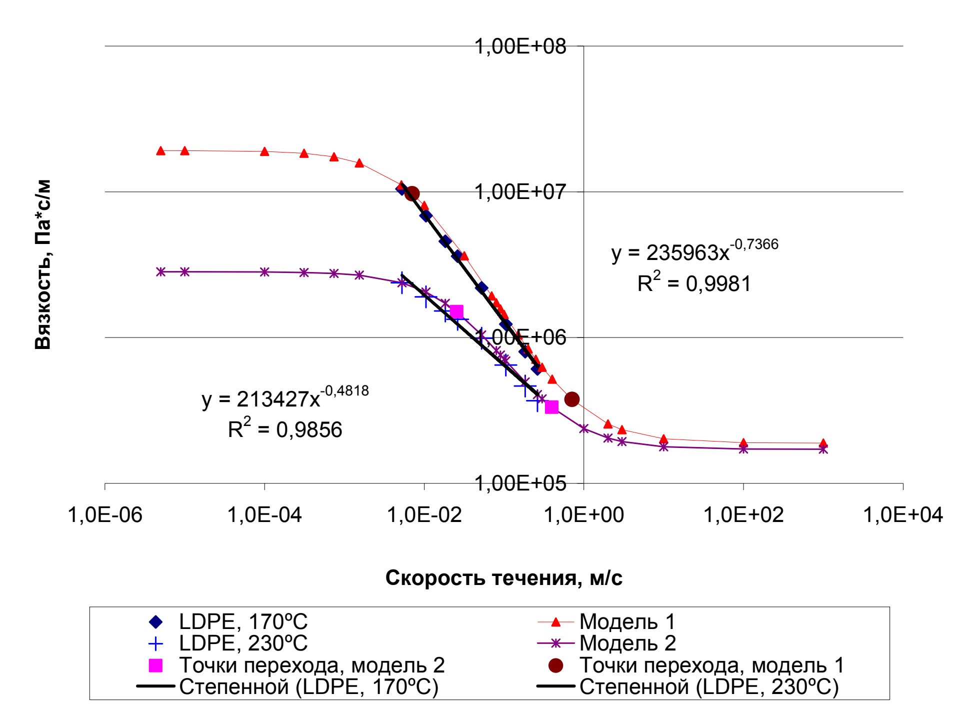


Рис. 3.16. Реологические характеристики LDPE при различных температурах и аппроксимация уравнением (3.1) с параметрами согласно таблицы 3.10.

Из графика видно что модель пробкового течения достаточно хорошо аппроксимирует реологическую кривую, даже на участке где вязкость меняется линейно в логарифмических координатах, то есть где применима степенная модель. Аппроксимация степенной моделью проведена в области неньютоновского течения.

В таблице 3.10 приведены параметры модели пробкового течения для реологической характеристики LDPE при различных температурах.

Таблица 3.10

Параметры модели течения

Параметр	Модель 1 (170°C)	Модель 2 (230°C)
α, град	82	70
V_r м/с	0,05	0,07
H, Па*с/м	1,91E+07	2,67E+06
η_o	1,92E+07	2,84E+06
η_∞	1,87E+05	1,71E+05
V_{t1}	0,007	0,026
V_{t2}	0,711	0,396

Анализ параметров «пробковой» модели показывает что температура влияет на все три параметра угол, скорость релаксации, константу вязкости. В степенной модели меняются два параметра константа вязкости и индекс течения. Для построения моделей с учетом температуры, необходимо дополнительно найти функциональную взаимосвязь параметров моделей от температуры.

Анализ точности аппроксимации в диапазоне скоростей от 0,005 до 0,25м/с (или в привычной скорости сдвига от 20 до 1000$с^{-1}$) при 230°С показывает, что максимальная относительная погрешность прогнозирования вязкости с помощью пробковой и степенной модели приблизительно одинаковы и не превышают соответственно 12,7% и 12,4%. Для температуры 170°С пробковая модель дает более высокую относительную погрешность – до 19,5%, при этом степенная не превышает 5,6%, При этом коэффициент корреляции для всех четырех моделей r > 0,99, коэффициент детерминации R^2>0,98. Преимущество модели пробкового течения очевидна – охват полного диапазона скоростей при сопоставимой точности прогнозирования со степенной моделью, в неньютоновской области течения.

3.3.6 Анализ процессов переработки, эффектов и технологических приемов экструзии на основе пробковой модели течения

Модель пробкового течения показывает, что в результате периодической релаксации макронеровностей расплава возникают колебания, причем их частота растет с повышением скорости течения. Можно предположить, что при их совпадении с частотой внутренних (температурных) колебаний возникает резонанс и наблюдается явление дробления поверхности экструдата или как его называют «акулья кожа» (“sharkskin”). То есть макронеровности резко увеличиваются в размере из-за резонанса. Таким образом объясняется почему снижение или повышение температур расплава устраняет эффект «акульей кожи», также режим супер-экструзии – работа при очень высоких скоростях сдвига, когда граница резонанса пройдена. Критическое напряжение сдвига $\tau_{кр}$, при котором наблюдается искажение поверхности, составляет 0,1÷0,4МПа [33], период пристенных колебаний расплава для рассматриваемых полимеров при достижении диапазона $\tau_{кр}$ составляет 10^{-5} –10^{-8}с.

Предложенный метод расчета каналов и модель течения и позволяют изучать взаимодействие пристенного и центрального слоев. Характер образования пристенного слоя также интересен. Понятно, что существует его зависимость от коэффициента трения расплава по металлу и термостойкости полимера. Температура головки влияет двояко, с одной стороны увеличение температуры снижает вязкость на стенке канала и пристенный слой становится тоньше и ускоряется, с другой растет деструкция расплава и растут отложения на стенках. При уменьшении температуры процесс обратный, происходит увеличение вязкости, пристенный слой нарастает, но разложение расплава уменьшается, это улучшает стабильность пристенного слоя W3.

Проведем качественный анализ воздействия на пристенный слой W3. Согласно расчетной схемы рис. 3.14, анализируется релаксация микронеровностей расплава которые в сечении представлены в виде треугольников, то есть рассчитывается изменение длины линии контакта при изменении скорости течения η=f(V_t). Но если рассматривать поверхность

канала и соответственно объемное течение, то необходимо вместо длины анализировать изменение площади поверхности соприкосновения сгустков макромолекул (макронеровностей). В зависимости от предполагаемой формы этих сгустков расчет площади будет меняться. Наиболее вероятная это шарообразная форма или для упрощения расчетов - пирамидальная, форма в виде треугольной пирамиды, которая более близка к расчетной схеме пробкового течения. Но в любом случае, для сферы или треугольной пирамиды, площадь взаимодействия будет пропорциональна квадрату длины линии взаимодействия то есть в модели это пристенная вязкость, $S \propto \eta^2$. Собственно в модели пробкового течения неньютоновской жидкости и предполагается что наблюдаемая вязкость это наложение двух факторов эффективной площади взаимодействия и межмолекулярного взаимодействия. Поэтому сила воздействующая на пристенный слой W3, будет пропорциональна квадрату вязкости: $F_{W3} \propto \eta^2 * V_t$. Такая функция имеет экстремум (выпуклость) в первой точке перехода в области низких скоростей сдвига – V_{t1} [76]. То есть для каждого сечения канала и каждой реологической кривой существует оптимальная производительность, при которой воздействие на пристенный слой максимально эффективно. Такое изменение силы F_{W3} (то есть наличие экстремумов), объясняет, почему эффективная промывка экструзионных головок обеспечивается переменной скоростью течения расплава в головке (периодическим изменением производительности и/или давления экструдера в диапазоне min-max) [11].

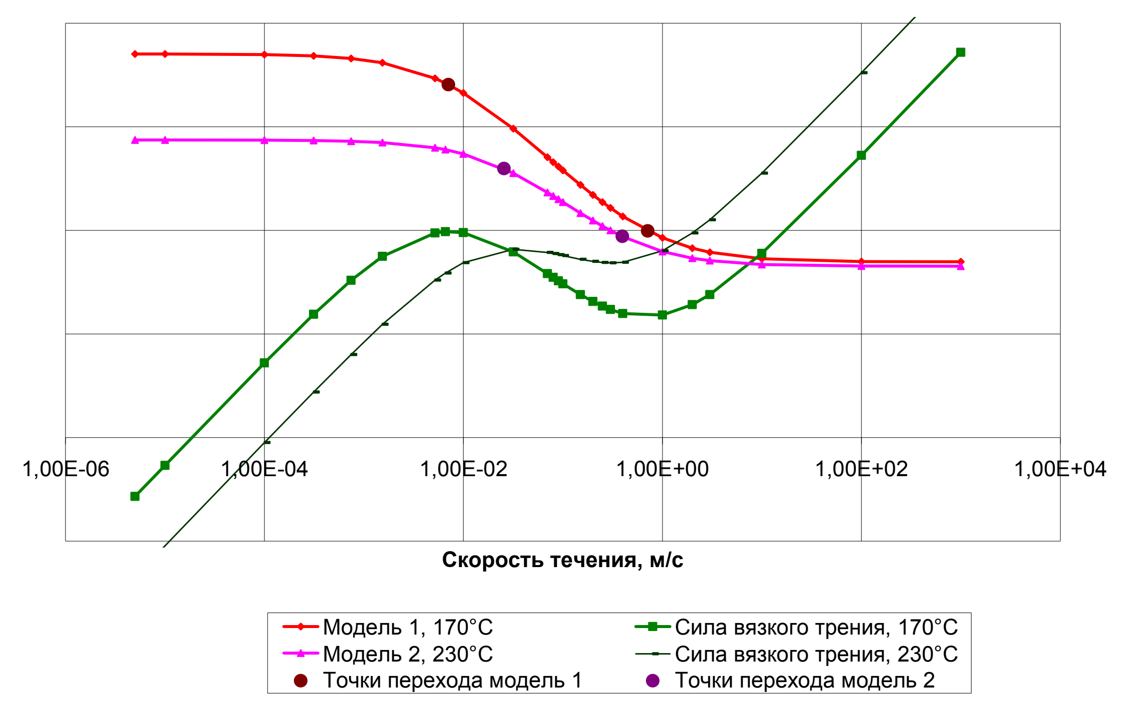


Рис. 3.17. Зависимость вязкости и силы вязкого трения от скорости течения.

Можно отметить следующую зависимость: на участке снижения вязкости уменьшение эффективной площади взаимодействия происходит быстрее чем увеличивается напряжения сдвига, поэтому сила вязкого трения уменьшается, хотя напряжение сдвига непрерывно возрастает.

Метод расчета течения на основе пробковой модели требует дальнейшего развития, параметры H, α, V_r характеризуют силу взаимодействия между слоями и зависят от межмолекулярного взаимодействия, температуры, разветвленности полимера, молекулярной массы, поэтому требуется дальнейшая привязка модели к молекулярным характеристикам полимера. Также представляет интерес исследовать силу, действующую на пристенный слой, и рассчитать скорость движения слоев W3, W2. На основании опытных данных, их скорость в несколько раз меньше скорости центрального слоя W1 и сильно зависит от качества и свойств покрытия формующего канала (тип материала, твердость, шероховатость, стойкость к коррозии, адгезионные свойства к расплавам полимеров, износостойкость, наличие микропор в поверхности).

3.4 Разработка модели движения расплава полимера в экструдере

Модели течения ньютоновской, неньютоновской жидкости степенного типа в шнеке экструдера были детально проработаны многими исследователями [33, 34], но в данных моделях используется ограничение – скорость на стенке неподвижного канала равна нулю. Также предполагается, что основным элементом, который создает давление в экструдере, является движущаяся поверхность. То есть когда вращается шнек, модель предполагает, что расплав как жидкость прилипает к поверхности и максимальная скорость развивается около стенки шнека в направлении его вращения. Прилипание расплава ко всей поверхности, которая движется, является обязательным условием работы экструдера.

При анализе способов создания давления, указывается [34] что основная идея работы экструдера в том, что это плоскость, свернутая в спираль, поэтому если подавать расплав двумя движущимися плоскостями, то можно значительно повысить производительность экструдера. Для реализации этой идеи было разработано экспериментальное устройство, состоящее из двух обогреваемых, вращающихся дисков, где расплав подавался поверхностями дисков, устройство надежно работало в лаборатории, но имело ряд недостатков, в частности ограниченную длину канала течения. Шнек не имеет такого ограничения, поэтому развитие конструкции экструдера [34] предлагалось следующим образом: витки не связаны со шнеком, сердечник шнека и цилиндр вращаются в одном направлении. В таком устройстве расплав, прилипая к сердечнику шнека и цилиндру, увлекается к выходу двумя поверхностями. При этом витки лучше вращать в противоположном направлении. Таким образом, теоретически, производительность увеличится в два раза по сравнению с обычной конструкцией экструдера (за счет прямого потока).

Но экструдер Helibar, где увеличена производительность на 30–50 %, без увеличения диаметра шнека, разработан с абсолютно другими конструктивными элементами. Отметим, что заявляется [45], в том числе, снижение затрат энергии на 10–60 % и ускоренная промывка при замене

рецептур, хотя на первый взгляд кажется что каналы в цилиндре в зоне движения расплава должны увеличивать количество застойных зон и ухудшать приспособленность экструдера к замене цвета.

Проведем анализ конструкции Helibar extruder на основе доступной информации [45, 77-81]. Продольные канавки улучшают теплоотдачу за счет увеличения площади поверхности цилиндра, смесительное и пластифицирующее действие происходит за счет барьерного шнека, повышение производительности за счет того, что пластифицированный материал дополнительно подается по канавкам (высотой 0,5–1,0мм) [81], которые проходят вдоль всего цилиндра. Канавки могут быть прямые или спиральные, как минимум нужна одна канавка, причем если канавка спиральная, то проходит перпендикулярно оси витка шнека [45]. Перерабатываются почти все термопластичные материалы и вторичное сырье. И что очень важно – расчет производительности экструдера возможен с применением модели «винт-гайка» [79]. То есть подтверждается, что движение расплава полимера (даже в такой сложной конфигурации каналов), можно рассматривать как движение гайки (пробки), насаженной на винт (шнек), и которая движется за счет торможения о стенки цилиндра и скольжения относительно вращающегося шнека. Следовательно, канавки действительно повышают производительность, но прежде всего создавая дополнительно торможение на поверхности пробки расплава.

Можно предположить, что расплав полимера, спиралью охватывающий шнек, обладает структурной прочностью – «формирует гайку», поэтому тормозящее действие канавок в цилиндре усиливает скольжение расплава (спирали) относительно шнека, соответственно производительность экструдера возрастает.

Таблица 3.11

Характеристики стандартных экструдеров в сравнении с HELIBAR

Фирма	Описание экструдера ø45мм	L/D	Рном, kW	Nmax, 1/min	Qmax, kg/h	Qmax/Nmax, кг*мин/об
Komax	Гладкий цилиндр, зона загрузки гладкая или с небольшими канавками (1950г)	26	13,2	100	50	0,50
	Цилиндр из состоит из двух частей, канавки в зоне загрузки на длине 5D, гладкий цилиндр на длине 25D (1980г)	30	35	200	160	0,80
	Экструдер HELIBAR (2000г)	30	37	210	180	0,86
EXTRU DEX GmbH	Экструдер HELIBAR / стандартный	30	34	150	135	0,90
	Экструдер HELIBAR /высокопроизводительный	36	75	275	300	1,09

Анализ характеристик экструдера Helibar, которые заявляются фирмами-производителями оборудования [77, 78], показывает, что по сравнению с экструдером с гладкой зоной загрузки, удельная (специфическая) производительность повышается в 2,18 раза (1,09/0,5), также повышается рабочая частота вращения шнека, соответственно пропорционально и общая производительность.

3.4.1 Течение между параллельными пластинами

Рассмотрим процесс течения между двумя параллельными пластинами, находящимися на расстоянии h, на основе общепринятого сдвигового течения и течения в виде «пробки». Одна пластина неподвижна, другая движется со скоростью V_0 (рис. 3.18).

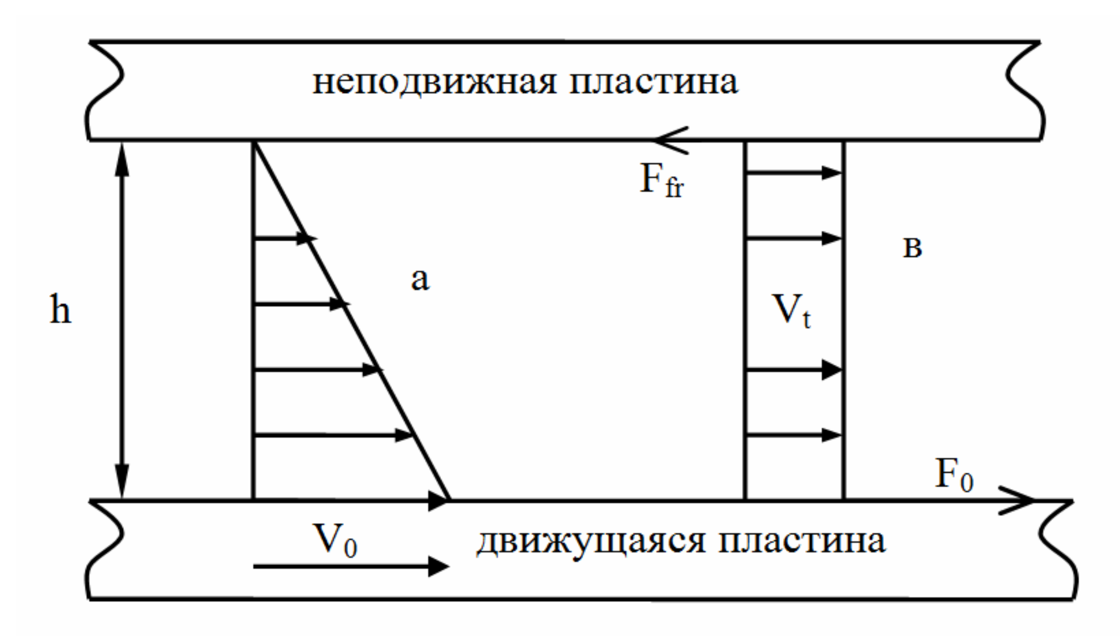


Рис. 3.18. Эпюры скоростей при различных моделях течения: а – сдвиговое течение, в – пробковое течение.

Анализ пробкового течения проводим по уравнениям из таблицы 3.5, при этом считаем, что расплав прилипает к пластинам с одинаковой силой и площадь пластин одинакова. Итоговая эпюра скоростей при таком течении прямоугольная, расплав увлекается движущейся пластиной.

$$F_{fr} = V_t \eta S_p \, ; \; F_0 = (V_0 - V_t)\eta S_p \, ;$$

где

F_{fr} – сила, препятствующая сдвигу «пробки» расплава, характеризующая прилипание (адгезию) расплава к неподвижной пластине;

F_0 – сила, действующая на пробку расплава со стороны движущейся пластины со скоростью V_0;

S_p – площадь поверхности пластин;

V_t – скорость движения пробки расплава;

η – пристенная вязкость, которая характеризует сопротивление сдвигу пробки на стенке пластины.

В установившемся режиме сила, действующая на пробку расплава со стороны движущейся пластины и увлекающая ее в сторону движения пластины, равна силе торможения пробки со стороны неподвижной пластины, поэтому:

$$V_t \eta S_p = (V_0 - V_t)\eta S_p \, ; \; V_t = V_0 / 2 \, .$$

То есть при одинаковой площади контакта и одинаковом трении (скольжении) расплава на подвижной и неподвижной пластинах скорость движения пробки будет в два раза меньше скорости движения пластины.

Поэтому расход на единицу ширины: $q_A = V_0 h/2$.

Таким образом, общепринятый подход анализа сдвигового течения [34] и анализ движения пробки дают одинаковый результат по расходу вынужденного течения.

3.4.2 Разработка модели движения расплава в шнеке

Анализ движения пробки расплава в зоне дозирования проводим аналогично анализу движения полимера в зоне питания червячного экструдера. На рис. 3.19 представлена схема, показывающая различные силы, действующие на элемент пробки расплава. Обозначения геометрических параметров шнека являются общепринятыми и соответствуют обозначениям в [34].

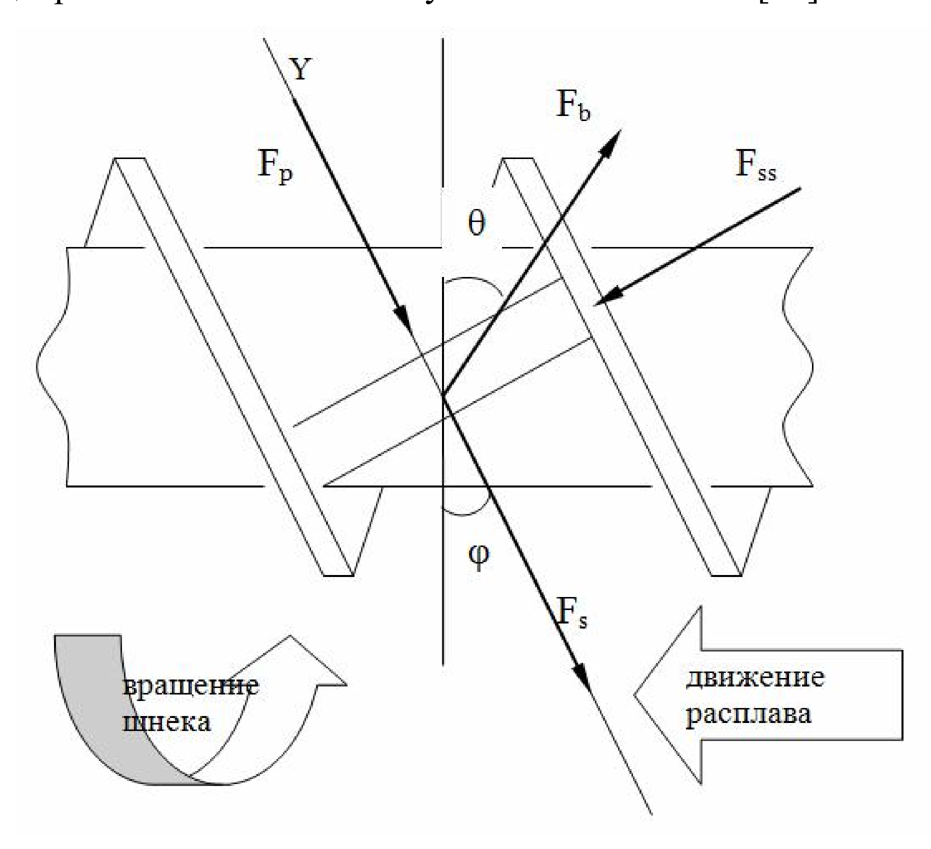


Рис. 3.19. Диаграмма сил, действующих на пробку расплава полимера: F_s – сила трения, действующая на расплав со стороны шнека; F_{ss} – сила, толкающая

расплав со стороны активной нарезки витка; F_b – сила трения, действующая на расплав со стороны цилиндра; F_p – сила, действующая на пробку расплава по причине противодавления в головке

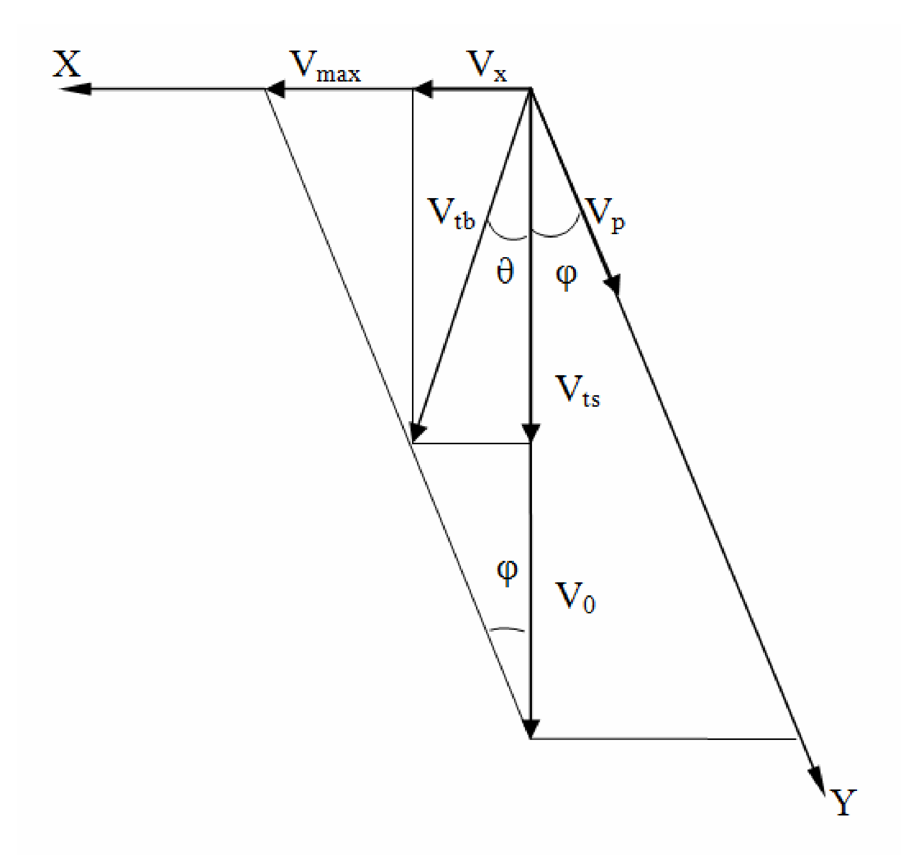


Рис. 3.20. Диаграмма скоростей движения расплава в зоне дозирования шнека: V_0 – скорость вращения шнека; V_{ts} – скорость движения пробки расплава относительно шнека; V_{tb} – скорость движения пробки расплава относительно цилиндра; V_x – полезная составляющая скорости движения пробки расплава вдоль оси шнека; V_{max} – максимально возможная полезная скорость движения пробки расплава; V_p – скорость движения пробки расплава под действием противодавления головки; φ – угол наклона витка; θ – угол трения

Согласно разработанной диаграмме скоростей (рис. 3.20), движение шнека и расплава связаны следующими соотношениями:

$$V_x = \frac{V_0}{\left(\frac{1}{tg\theta} + \frac{1}{tg\varphi}\right)}; \; V_0 = \pi DN. \quad (3.8)$$

$$V_x = V_{tb} \sin\theta; \; V_x = V_{ts} tg\theta. \quad (3.9)$$

Движение расплава при отсутствии давления на выходе зоны дозирования

Силы, действующие на элемент пробки, можно выразить через геометрические параметры шнека, пристенную вязкость и скорости движения шнека, для этого рассмотрим уравнение установившегося движения при условии $V_p = 0$, $F_p = 0$, проекция на ось витка Y:

$$F_b \cos(\theta + \varphi) = F_s \ . \qquad (3.10)$$

Согласно модели пробкового течения:

$$S_b \eta_b V_{tb} \cos(\theta + \varphi) = S_s \eta_s \frac{V_0 - V_{ts}}{\cos \varphi} \ , \qquad (3.11)$$

где S_b – площадь поверхности цилиндра; S_s – площадь поверхности шнека; S_w – площадь сечения витка, сечение перпендикулярно оси Y.

После преобразований, с учетом уравнений (3.9), получаем уравнение для расчета угла трения θ:

$$\frac{1}{tg\theta} = \frac{S_s \eta_s}{S_b \eta_b \sin\varphi \cos\varphi} + tg\varphi \ . \qquad (3.12)$$

Последовательность расчета «прямого потока»:

1. по реологическим характеристикам, константам пристенной вязкости (3.1) рассчитываем соотношение $\eta_s / \eta_b = H_s / H_b$;

2. определяем угол трения по уравнению (3.12),

3. по уравнению (3.8), задаваясь скоростью вращения шнека N, определяем скорость движения пробки расплава V_x;

4. рассчитываем производительность зоны дозирования $Q = V_x \pi D h (1 - e/t)$;

5. рассчитав скорости движения V_{tb} и V_{ts} по уравнениям (3.9), определяем соответствующую пристенную вязкость на стенке цилиндра η_b и шнека η_s по уравнению (3.1).

Движение при наличии противодавления

При наличии противодавления ΔP на выходе зоны дозирования скорость расплава уменьшается. Торможение расплава, «скорость обратного потока», рассчитаем с применением модели пробкового течения (таблица 3.5) в направлении оси витка:

$$V_p = \frac{\Delta P S_w}{(S_b + S_s)\eta_{cp}}, \tag{3.13}$$

где средняя вязкость в канале: $\eta_{cp} = (\eta_s + \eta_b)/2$.

Вязкость на стенке цилиндра η_b и шнека η_s рассчитываем по скорости движения расплава относительно шнека V_{ts} и цилиндра V_{ts} по уравнениям (3.8, 3.9) без учета противодавления, это допустимо, так как для расчета скорости V_p используется средняя вязкость η_{cp} в канале. Для расчета η_b и η_s требуется применять соответствующую реологическую модель согласно уравнению (3.1), где константы вязкости $\eta_s/\eta_b = H_s/H_b$.

Результирующая скорость движения расплава вдоль оси шнека:

$$V = V_x - V_p \sin\varphi\ . \tag{3.14}$$

Итоговое уравнение работы зоны дозирования шнека получаем после подстановки переменных из уравнений (3.8), (3.12), (3.13) в (3.14):

$$V = \frac{\pi DN \sin\varphi \cos\varphi}{\frac{S_s\eta_s}{S_b\eta_b} + 1} - \frac{\Delta P}{\eta_{cp}} \frac{S_w \sin\varphi}{(S_b + S_s)}\ . \tag{3.15}$$

Для зоны дозирования с длиной L, с шириной витка w и высотой витка h:

$$S_w = hw;\ S_b = \frac{Lw}{\sin\varphi};\ S_s = \frac{L(w+2h)}{\sin\varphi}. \tag{3.16}$$

Если принять, что $\eta_s/\eta_b = 1$, тогда уравнение работы зоны дозирования преобразуется к виду более удобному для инженерных расчетов:

$$V = \frac{w}{2(h+w)}\left[\pi DN \sin\varphi\cos\varphi - \frac{\Delta P h \sin^2\varphi}{\eta_{cp} L}\right] \tag{3.17}$$

Коэффициент формы канала

$F_d = F_p = w/(h+w)$. (3.18)

Производительность зоны дозирования

$Q = V\ \pi Dh(1-e/t)$. (3.19)

Если считать, что площади шнека и цилиндра одинаковы и равны площади цилиндра (когда $w >> h$), то при таком упрощении моделируется движение между параллельными пластинами «пробки» расплава, и уравнение работы зоны дозирования преобразуется к виду:

$$V = \frac{\pi DN \sin\varphi \cos\varphi}{2} - \frac{\Delta P}{\eta_{cp} L}\frac{h \sin^2\varphi}{2} . \quad (3.20)$$

Рассчитав значение скорости V, необходимо уточнить угол трения, который меняется под действием противодавления:

$$V = V_{ts} tg\theta \ . \quad (3.21)$$

3.4.3 Сравнительный анализ полученных уравнений с классическим уравнением экструзии

Классическое уравнение экструзии ньютоновской жидкости $Q_c = \alpha N F_d - \beta \frac{\Delta P}{\mu} F_p$, преобразуем к виду, где будут учитываться только скорости движения расплава вдоль оси однозаходного шнека $V_c = V_{xc} - V_{pc}$:

$$V_c = \frac{Q_c}{\pi Dh\left[1-e/t\right]} = \alpha_1 N F_d - \beta_1 \frac{\Delta P}{\mu} F_p \quad (3.22)$$

Или, без учета коэффициентов формы F_d, F_p (когда $w >> h$):

$$V_c = \frac{\pi DN \cos\varphi \sin\varphi}{2} - \frac{\Delta P}{\mu L}\frac{h^2 \sin^2\varphi}{12} \quad (3.23)$$

Проведем анализ расчетов по уравнениям (3.20) и (3.23)

Прямой поток одинаков для обеих моделей. Для равенства обратного потока необходимо чтобы:

$$1/\eta_{cp} = h/6\mu . \qquad (3.24)$$

Такое же соотношение вязкостей получается и при анализе течения между параллельными пластинами по сдвиговой и пробковой модели течения (таблица 3.5). Таким образом, уравнения (3.20) и (3.23) тождественны.

Уравнения (3.15) и (3.17) имеют более общий характер по сравнению с классическим уравнением экструзии, учитывают неньютоновский характер течения расплава, при этом достаточно просты для понимания и практического применения. Уравнение (3.15) учитывает качество поверхности шнека и цилиндра, которое влияет на отношение η_s/η_b .

3.4.4 Результаты моделирования течения в зоне дозирования

В качестве примера рассмотрим расчеты по уравнениям (3.17) и (3.22).

Материал ПЭВД, температура переработки 230^0С, плотность ρ=1г/см^3 , реологические характеристики, измерение на стандартном капилляре D=2,1мм, L=8мм:

Таблица 3.12

Реологические характеристики ПЭВД

Параметр	Значение			
Скорость сдвига, с$^{-1}$	1	20	100	400
Вязкость, Па*с	738	625	350	170

На основе реологической характеристики были рассчитаны параметры моделей течения материала.

Таблица 3.13

Параметры моделей течения материала ПЭВД

Модель течения	Параметр		Значение	Диапазон скоростей
Пробковая $\eta = \frac{H}{\sin\alpha} - \frac{H}{\frac{V_r}{V_t tg\alpha}+1}$	Угол взаимодействия	α, [град]	70	V_t , [м/с] $[0;+\infty]$
	Скорость релаксации	V_r [м/с]	0,07	
	Константа пристенной вязкости	H, $\left[\frac{Па*с}{м}\right]$	2,66E+06	
Степенная $\mu = m_0\gamma^{n-1}$	Константа вязкости	$m_{0,}$ [Па*с]	2976	γ , [c^{-1}] $[20;1000]$
	Индекс течения	n	0,52	
	Вязкость при нулевой скорости течения	μ_o, [Па*с]	745	

Далее при моделировании течения в зоне дозирования пристенную вязкость расплава в шнеке η_b и η_s рассчитываем согласно параметрам модели из табл. 3.13, скорости движения пробки расплава V_t (V_{tb} ,V_{ts}) – по уравнениям (3.9).

Вязкость для классической модели определяли по степенной модели, с параметрами из табл. 3.13, скорость сдвига $\gamma = \pi DN / h$. Отношение обратного потока к прямому по уравнению: $\alpha = V_p / V_x * 100$

Необходимо отметить, что для стандартного капилляра между константой пристенной вязкости H и вязкостью μ_1 существует взаимосвязь $H \approx 3810 * \mu_1$ [73].

Геометрические параметры исследуемого шнека: D=45мм, $\varphi=17{,}5^0$, e=5мм, L=600мм, h=4мм, w=37,7мм. Согласно уравнению (3.12) при ΔP=0 угол трения составляет $\theta = 12{,}42^0$.

Анализ результатов моделирования, приведенных в табл. 3.14, показывает, что обе модели дают близкие результаты, различие в прогнозировании

производительности не более 10 % . Основное влияние оказывают формулы для расчета коэффициента формы канала, скорости сдвига и вязкости.

Таблица 3.14

Сравнительные расчеты по двум моделям зоны дозирования шнека

Параметр	Результаты моделирования					
	1	2	3	4	5	6
ΔP, [Бар]	20	300	20	300	20	300
N, [об/мин]	10	10	40	40	80	80
Пробковая модель						
θ , [град]	11,28	-5,25	11,88	4,19	12,01	6,24
Q, [кг/ч]	4,96	-2,29	20,94	7,30	42,35	21,75
α , [%]	9,45	141,76	4,45	66,71	3,36	50,37
Сдвиговая модель						
Q_c, [кг/ч]	5,19	-2,27	21,87	7,36	44,37	24,13
$\boldsymbol{\alpha_c}$, [%]	9,3	139,6	4,5	67,9	3,2	47,3

Согласно результатам, приведенным в табл. 3.15, управляя параметром η_s/η_b можно регулировать производительность экструдера. Максимально возможный угол трения, прогнозируемый по уравнению (3.12), составляет 72,5 град, при этом производительность составит 97кг/ч.

При достижении максимально высокого торможения расплава на стенке цилиндра и скольжения на стенке шнека производительность экструдера повышается в 2,21 раза (97/43,8), такой уровень хорошо согласуется с повышением удельной производительности в 2,18 раза, в экструдере Helibar согласно данным табл. 3.11.

Таблица 3.15

Влияние соотношения пристенных вязкостей шнек/цилиндр на производительность исследуемой зоны дозирования

Параметр		Результаты моделирования (N=80об/мин)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔP, Бар	η_s / η_b	10,0	5,0	3,01	2,01	1,02	0,53	0,37	0,24	0,13	0,07
300	θ ,[град]	0,4	0,9	1,6	2,7	6,2	13,5	20,0	29,8	43,1	53,0
	Q,[кг/ч]	2,2	4,5	7,7	11,6	21,8	35,3	43,3	51,9	59,7	63,8
0	θ ,[град]	1,3	2,7	4,4	6,5	12,4	22,4	30,1	40,8	53,6	62,3
	Q,[кг/ч]	7,4	13,7	20,9	28,3	43,8	60,4	69,1	78,0	86,5	91,4

Анализ данных табл. 3.16 показывает, что применение степенной и пробковой моделей течения, по сравнению с ньютоновской, имеют большую сходимость результатов прогнозирования производительности.

Таблица 3.16

Влияние вида модели течения расплава применяемой для расчета обратного потока на производительность экструдера

Исходные параметры			Результаты моделирования (ΔP=200Бар)						
Модель течения	Частота вращения	N	0,1	1,0	5,0	10,0	40,0	80,0	120,0
Ньютоновская при μ_o=745Па*с	Производ-ительность	Q_n	-9,0	-8,5	-6,2	-3,4	13,8	36,7	59,6
Степенная Табл 3.13		Q_c	-0,5	-1,2	-1,0	0,4	12,5	31,4	51,2
Пробковая Табл 3.13		Q	-3,4	-3,1	-1,6	0,3	12,2	29,1	47,0

Необходимо отметить, что оба подхода взаимно дополняют друг друга. Пробковое течение более характерно для высоковязких, высокомолекулярных полимеров, при большом количестве наполнителей, в технологиях, где

применяются процессинговые, антипригарные добавки которые влияют на скольжение расплава относительно поверхности каналов экструдера.

Сдвиговое течение развивается при высокотемпературной переработке, экструзии низкомолекулярных полимеров. Также на характер течения оказывают влияние размеры каналов, материал покрытия каналов течения расплава и износ оборудования.

Выводы по третьему разделу

1. При проектировании распределительных каналов соэкструзионных головок для эксплуатации в условиях единичного производства необходимо стремиться обеспечить постоянную и максимально высокую скорость сдвига по всей длине копильника
2. Основными технологическими параметрами влияющими на распределение потоков расплава в экструзионной головке является индекс течения, температура и производительность. Диапазон рациональных значений индекса течения составляет 0,25 до 0,5.
3. Повышение температуры переработки и снижение производительности частоты вращения шнека улучшает процесс распределения расплава, поскольку увеличивают индекс течения, но следует учитывать, что существует оптимальное значение индекса течения (температуры и производительности).
4. Неньютоновское поведение расплавов полимеров связано со сложной геометрией течения, спутанностью макромолекул и упругостью высокомолекулярной жидкости.
5. Модель пробкового течения разработана на основе физической модели и более точно, по сравнению с эмпирическими моделями, аппроксимирует реологическую кривую в полном диапазоне скоростей течения расплава. Модель позволяет изучать взаимодействие в пристенной области течения, это важно для высокоскоростных процессов экструзии, в условиях мелкосерийного производства при частых переналадках и смене рецептур.
6. Разработан метод расчета основных параметров течения неньютоновской жидкости в полном диапазоне скоростей,

который основан на анализе прилипания (адгезии) расплава к поверхности формующего канала, предложена новая размерность для вязкости, как отношение давления к линейной скорости, и формулы пересчета слоистого течения в пробковое.

7. Проведен анализ и дано качественное объяснение: эффекту нестабильного течения расплава полимера “sharkskin” как области резонанса из-за совпадения частоты релаксационных колебаний в пристенной области и внутренних (температурных) колебаний макромолекул; технологическому приему переменной скорости течения при промывках экструзионного оборудования, эффективность переменной скорости промывки объясняется наличием оптимальной скорости течения, когда сила воздействующая на пристенный слой максимальна в области низких скоростей сдвига.
8. Представление течения расплава полимера в виде пробки, которая обладает определенной формой и скользит по поверхности формующего канала, дополняет теорию процессов переработки пластмасс, дает новое понимание работы зоны дозирования одношнекового экструдера.
9. Анализ процессов экструзии с помощью сдвигового и пробкового течения дает близкие результаты, различие в прогнозировании производительности экструдера 45мм с гладким цилиндром, составляет не более 10% в области скоростей вращения шнека от 5 до 120 об/мин.

Раздел 4. Исследование многослойного течения

Оснащение системами гравиметрического или объемного дозирования расплава современных соэкструзионных линий является стандартным решением для управления производительностью экструдеров по каждому слою. Система дозирования расплава является одним из ключевых модулей соэкструзионной линии.

Важной задачей по технологии соэкструзии является управление многослойной структурой, что предполагает прогнозирование распределения слоев при определенном соотношении производительностей экструдеров.

4.1 Исследование стабильности многослойной структуры при гравиметрической дозировании расплава

Исследование проводилось на соэкструзионной линии оснащенной системой гравиметрии [76].

Таблица 4.1

Технологические параметры исследуемого процесса

Характеристика	А (внешн.)	В	С	Д	Е (внутр.)
Диаметр шнека, мм	45	25	45	25	30
Диапазон производительности, кг/час	2-30	0,5-5	2-30	0,5-5	1-20
Мощность привода, кВт	30	15	30	15	20
Максимальная частота вращения, об/мин	160	150	160	150	160
Материал	PA	TIE	LDPE	TIE	PA
Индекс текучести (190С, 2,16кг) Основной материал (80-100%) Суперконцентрат красителя (0-20%)			2,0-4,0 1,2-11,7		
Индекс текучести (230С, 2,16кг) Основной материал (80-100%) Суперконцентрат красителя (0-20%)	2,5-5,5 8,0-22,0	2,0-3,0	5,0-7,0	2,0-3,0	2,5-5,5 8,0-22,0

Соэкструзинная головка для формирования трубчатой заготовки, имеет спиральные 8-ми заходные распределители. Каналы совместного течения толщиной 3-5мм диаметр 120мм, формующая дюза диаметром 50мм, толщина зазора 1,5мм, длина канала 25мм. Температура расплава на выходе из головки (контроль с помощью пирометра) 230-250^{0}С. Суперконцентраты красителей имели основу соответствующую материалу слоя, термостокость 250-300^{0}С. Дискретность измерения расхода для каждого экструдера – 0,01кг.

Гравиметрическая система на основе текущего значения параметра α = Q/N (отношение производительности к частоте вращения) рассчитывает необходимую производительность каждого экструдера с учетом плотности материала и автоматически устанавливает ее. Затем каждые 0,5мин измеряется производительность экструдера и при необходимости корректируется частота вращения шнека.

Стабильность поддержания заданной толщины слоя находилась в диапазоне ±0,5% для всех слоев, контроль проводился по данным системы управления гравиметрией соэкструзионной линии.

4.1.1 Исследование точности контроля многослойной структуры при соэкструзии различных рецептур

Пленочные материалы пятислойной структуры толщиной 35-45мкм проходили измерение на системе видеоконтроля SVC.

Абсолютная погрешность измерения толщины слоя Δ=0,4мкм. С учетом того, что толщина пленки 40мкм, что составляет 100% толщины для системы гравиметрического дозирования, абсолютная погрешность (при анализе процентного соотношения слоев) составляет Δ=1%.

При этом изучалось влияние следующих факторов: MFI слоя, заданной толщины слоя на гравиметрии, структуры на итоговую толщину слоя в пленке. Диапазон MFI для рецептур №1-25 варьировался в диапазоне согласно таблицы 4.1.

Количество экспериментальных точек N определялось частотой встречаемости рецептуры в производстве, период проведения исследований 1 месяц.

Таблица 4.2

Сводная таблица результатов измерения

Материал	N	Задание гравиметрией, Δ=0,5%					Измерение толщины слоя при помощи видеосистемы, Δ=1%				
		Е	Д	С	В	А	Е	Д	С	В	А
Рецепт №1-10	53	20	2	31	2	45	20,4±2,0	3,3±0,7	31,2±3,2	3,1±0,8	42,0±3,1
Рецепт №11-15	10	20	2	40	2	36	20,4±2,0	4,2±1,0	33,6±2,6	4,2±0,3	37,6±2,4
Рецепт №16-18	5	10	2	21	2	65	10,5±1,2	4,0±1,3	19,7±1,9	3,1±0,9	62,6±2,4
Рецепт №19-25	31	20	2	50	2	26	21,7±2,1	3,4±0,9	47,3±3,2	3,3±0,7	24,3±2,2
Рецепт №1 в слое С краситель 10%	11	20	2	31	2	45	20,5±1,6	3,6±1,0	32,7±2,0	3,7±1,0	39,6±2,3
Рецепт №2 в слое С краситель 3%, в слое Е 15%	8	20	2	31	2	45	19,2±2,0	3,3±0,3	30,8±2,9	3,2±0,7	43,6±4,3
Рецепт №8 без красителей	5	20	2	31	2	45	20,6±1,9	3,7±1,2	31,2±3,0	3,2±1,4	41,3±1,4
Рецепт №3 в слое С краситель 3%, в слое Е 15%	6	20	2	31	2	45	19,1±1,7	2,8±0,7	31,8±4,5	2,7±1,0	43,6±4,0
Рецепт № 4 в слое С краситель 20%, в слое Е 3%	8	20	2	31	2	45	21,0±2,7	3,6±1,1	33,0±3,9	3,6±0,8	38,9±2,9

Анализ данных таблицы 4.2 показывает, что нет заметного влияния вязкости, положения слоя в головке на его итоговую толщину. Все в основном определяет объемная производительность установленная на экструдере. Можно отметить высокое среднеквадратичное отклонение толщины слоя от заданной, но здесь влияние оказывает высокая погрешность измерения, так как пленка очень тонкая и существует размытость межфазной границы раздела слоев.

4.1.2 Исследование точности контроля многослойной структуры для одного рецепта

Следующий эксперимент проводился следующим образом: задавалась различное процентное соотношение в многослойной структуре (PA/TIE/LDPE/TIE/PA), общая производительность установки не менялась. Полученная таким образом многослойная заготовка анализировалась на системе видеоконтроля SVC с увеличением 300 раз.

Проводилось измерение 1 среза. Погрешность измерения толщины слоя (по сравнению с первым исследованием) была снижена в 10 раз, так как анализировался первичный рукав (350мкм) который имеет толщину в 10 раз больше чем толщина пленочного изделия, поэтому абсолютная погрешность

измерения толщины слоя в пересчете на процентное содержание слоя в структуре составляет Δ=0,1%. Использовался рецепт №8 без красителей.

Таблица 4.3

Сравнительные результаты заданной и фактической толщины слоя

	Структура задаваемая гравиметрической системой, Δ ±0,5%					Измерение толщины слоя при помощи видеосистемы, Δ=0,1%				
№п/п	А	В	С	Д	Е	А	В	С	Д	Е
1	18,5	2,5	36,6	2,8	39,6	15,8	3,75	32,7	2,41	45,3
2	18,5	2,5	36,6	2,8	39,6	15,8	3,75	32,7	2,41	45,3
3	18,5	2,5	36,6	2,8	39,6	19,2	2,82	32,1	3,38	42,5
4	18,5	2,5	36,6	2,8	39,6	19,2	2,78	31,1	3,33	43,6
5	17,6	2,4	34,9	2,7	42,4	18,0	4,0	36,6	4,57	36,9
6	17,6	2,4	34,9	2,7	42,4	20,1	2,83	41,1	2,83	33,1
7	17,5	2,4	30,3	2,7	47,1	17,6	2,85	24,7	2,3	52,6
8	39,9	2,6	30,3	2,9	24,2	47,1	1,63	30	2,45	18,8
9	20,0	2,5	38,5	2,5	36,0	23,8	2,58	35,4	2,58	35,7
10	45,0	2,5	30,0	2,5	20,0	45,2	1,69	25,7	1,69	25,7
11	39,6	2,8	36,7	2,5	18,5	43,2	5,09	31,9	2,95	16,9
12	47,1	2,7	30,3	2,4	17,5	51,6	2,02	23,9	2,27	20,2
13	39,9	2,5	30,5	2,8	24,2	46,2	1,36	29,9	1,63	20,9
Среднее	27,6	2,52	34,1	2,68	33,1	29,4	2,86	31,4	2,68	33,7

Регрессионный анализ толщин слоев заданный гравиметрией и итоговой толщины измеренной на видеосистеме показывает что коэффициент корреляции составляет 0,95, расчетное значение критерия Фишера Fр = 1411 гораздо больше табличного значения Fт=7,04 для уровня значимости α=0,01. Количество экспериментальных точек n=65, k – количество исследуемых факторов, k=1, степени свободы v1 = n – df – 1, 65-63-1=1 и v2 = df=63 поэтому существует статистическая взаимосвязь между параметрами.

Анализ значений таблицы 4.3 показывает, что средний слой по факту тоньше на 3-6% от заданного гравиметрией, в то же время внешний и внутренний слой наоборот толще на 0,5-5%.

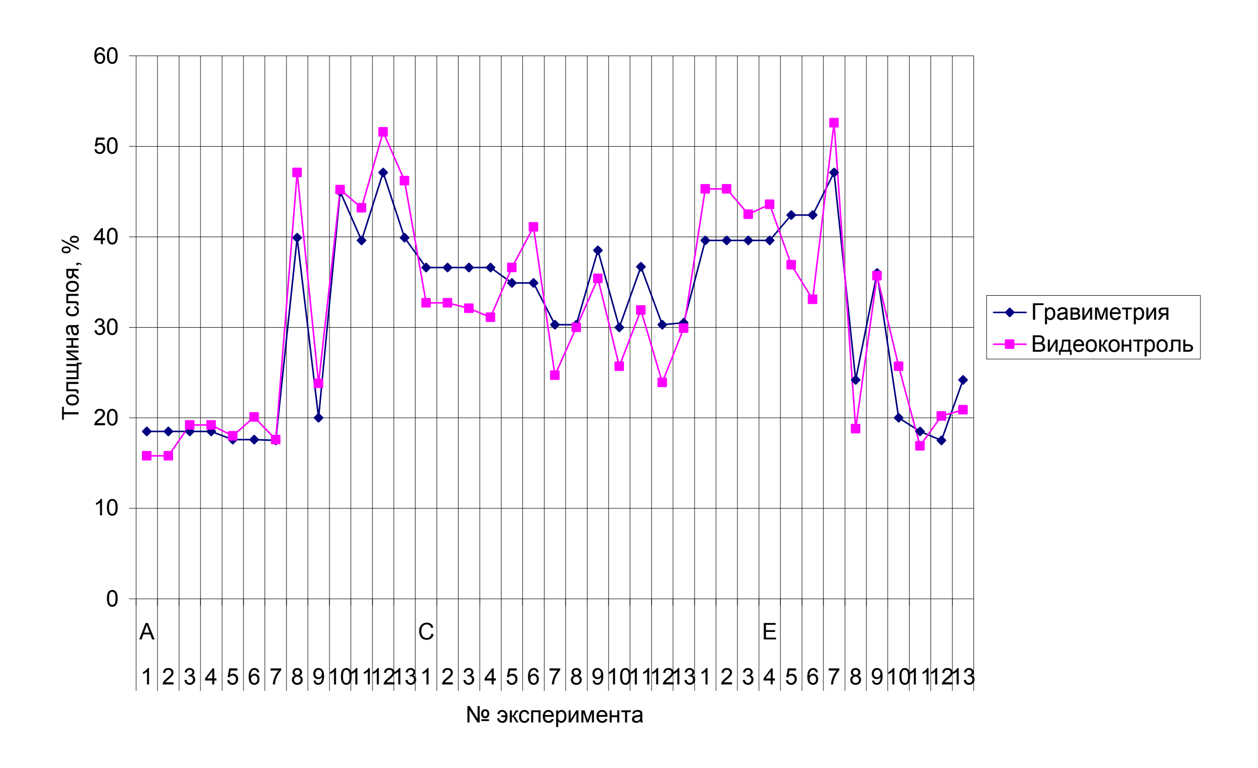


Рис. 4.1. Сравнение данных гравиметрической системы управления и измеренной толщины слоя системой видеоконтроля

4.1.3 Сравнительный анализ данных гравиметрической системы управления и распределения слоя в головке

Для уточнений выводов по предыдущему эксперимента проводилось исследование распределения слоя в головке, то есть для одного среза измерялась толщина слоев по кругу в различных участках сечения. Первичный рукав толщиной 350мкм. Слои В, С, Д измерялись вместе так как визуально адгезив больше похож на полиэтилен, а граница с полиамидом более четко выражена.

Таблица 4.4

Технологические режимы первичного формования при получении образца по рецепту №8 (бесцветный)

Параметр	A	B	C	D	E	Итого
N об/мин	49	19	113	19	44	
Q, кг/час	19,9	1,1	17	1,1	11,1	50,2
Q/N кг/60об	0,450	0,056	0,150	0,058	0,251	
Проц, %	36	2,5	39	2,5	20	100
P, г/см^3	1,14	0,9	0,9	0,9	1,14	
I, A	27	2,4	15	2,1	8,1	

Таблица 4.5

Итоговые данные по распределению слоев

Рецепт №8 бесцветный	Слой		
Показатель	А	В+С+Д	Е
Структура заданная на гравиметрии, %	36,0	44,0	20,0
Производительность, кг/час	19,9	19,2	11,1
Структура, измерение на видеосистеме, по результатам 7-ми измерений на одном сечении, %	37,3±0,78	41,4±4,38	21,3±4,16

Таблица 4.6

Итоговые данные по распределению слоев

Рецепт №1 в слое С коричневый краситель 10%.	Слой		
Показатель	А	В+С+Д	Е
Структура заданная на гравиметрии, %	45,0	25,0	30,0
Производительность, кг/час	12,7	5,6	8,4
Структура, измерение на видеосистеме, по результатам 3-х измерений на одном сечении, %	46,0±1,35	22,4±1,68	31,6±0,5

Отклонение толщины слоя от средней можно считать удовлетворительным так как современные соэкструзионные головки имеют отклонение от общей толщины для диапазона ±2S не более 7% и если 7% более

4мкм то отклонение нормируется ±4мкм (по материалам фирмы Macro, Канада).

Результаты анализа данных таблиц показывают что наблюдается также как и во втором эксперименте толщина среднего слоя на 2,6% меньше чем заданная на гравиметрии, соответственно внешние слои на столько же толще.

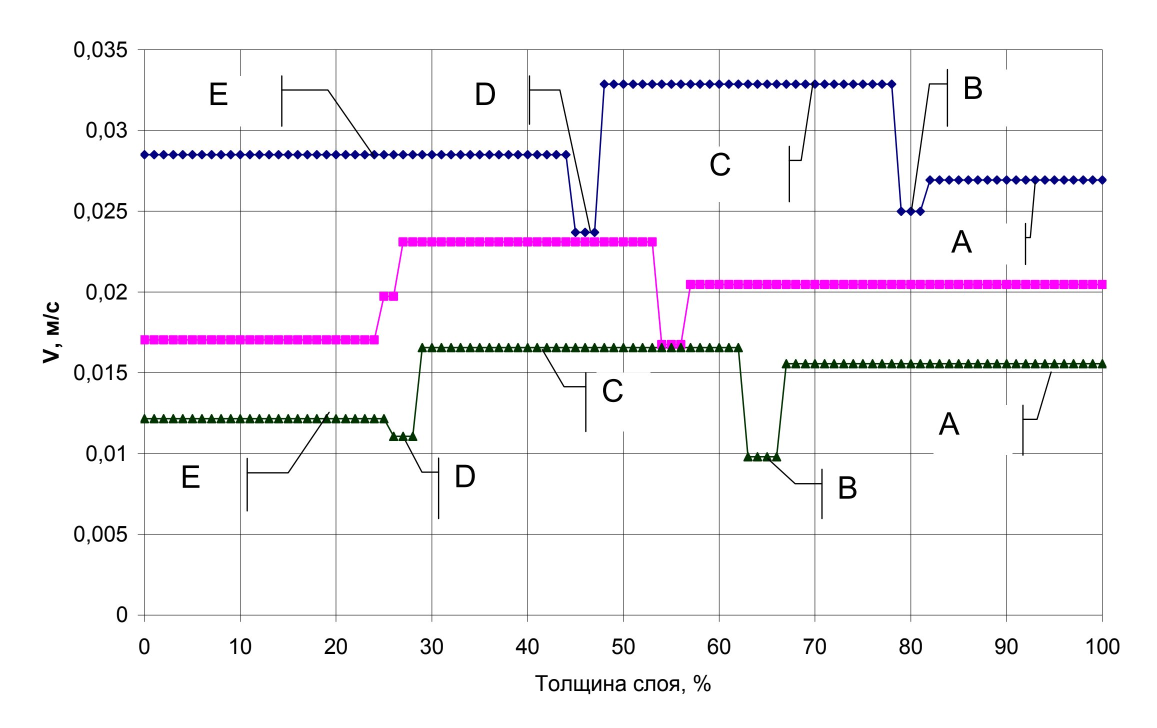


Рис. 4.3. Эпюра скоростей многослойных потоков построенная по экспериментальным результатам

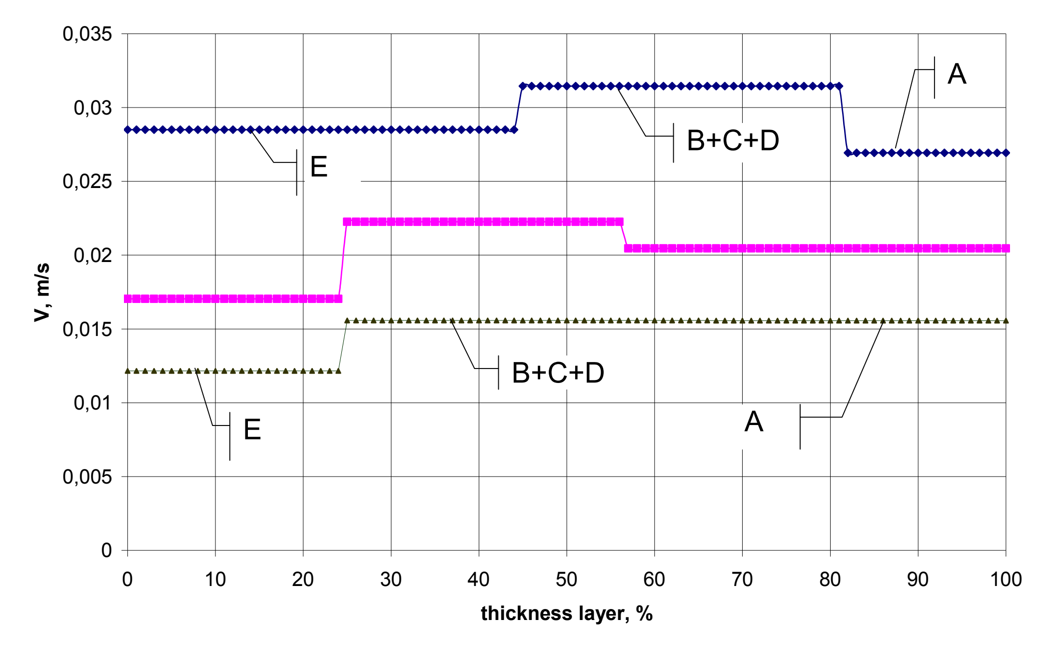


Рис. 4.2. Эпюры скоростей многослойного течения полученные на основе экспериментальных данных, слои B, C, Д объединены в один слой

Типичные режимы соэкструзии и итоговая многослойная структура.	Слой	Структура измеренная на фото, %	Прозводителньость экструдера, кг/ч	Структура по гравиметрии, %
	1	25,8	5,5	20
	2	3,5	0,5	2,5
	3	34,3	8,4	38,5
	4	3,0	0,5	3,0
	5	33,3	9,8	36

Рис. 4.4. Структура многослойного материала и технологические режимы ее получения.

Анализ эпюр скоростей многослойного течения (рис. 4.3, 4.4) и изучение срезов с применением системы видеоконтроля (рис 4.5, 4.6, 4.7) показывает, что при соэкструзии течение носит пробковый характер при этом наблюдается пристенный слой толщиной 0,5-8% который образовывается из-за скольжения расплава на поверхности канала головки. То есть внешний и внутренний слой имеют как бы двухслойную структуру.

	Структура 5 слойного материала (PA/TIE/LDPE/TIE/PA). Толщина 350мкм.	Слой	Q кг/ч	Структура по гравиметрии
	Пристенный W2 слой PA 3,0%	1	9,5	18,5%
	Внешний слой PA 16,1%			
	Адгезив TIE 2,8%	2	1,02	2,5%
	Средний слой LDPE 31,1%	3	14,9	36,6%
	Адгезив TIE 3,3%	4	1,14	2,8%
	Внутренний слой PA 40%	5	22,95	39,6%
	Пристенный W2 слой PA 3,6%			

Рис. 4.5. Аналитическое описание типичной многослойной структуры. Вверху видно прикосновение шариковой ручкой.

№1

Е		Д	С	В	А	
25,5		3,7	34,6	4,3	31,9	
$Е_1$	$Е_2$	Д	С	В	$А_2$	$А_1$
3,2	22,3	3,7	34,6	4,3	30,3	1,5

№2

Е		Д	С	В	А	
22,2		2,1	35,4	3,2	37,0	
$Е_1$	$Е_2$	Д	С	В	$А_2$	$А_1$
3,2	19,0	2,1	35,4	3,2	31,7	5,3

№3

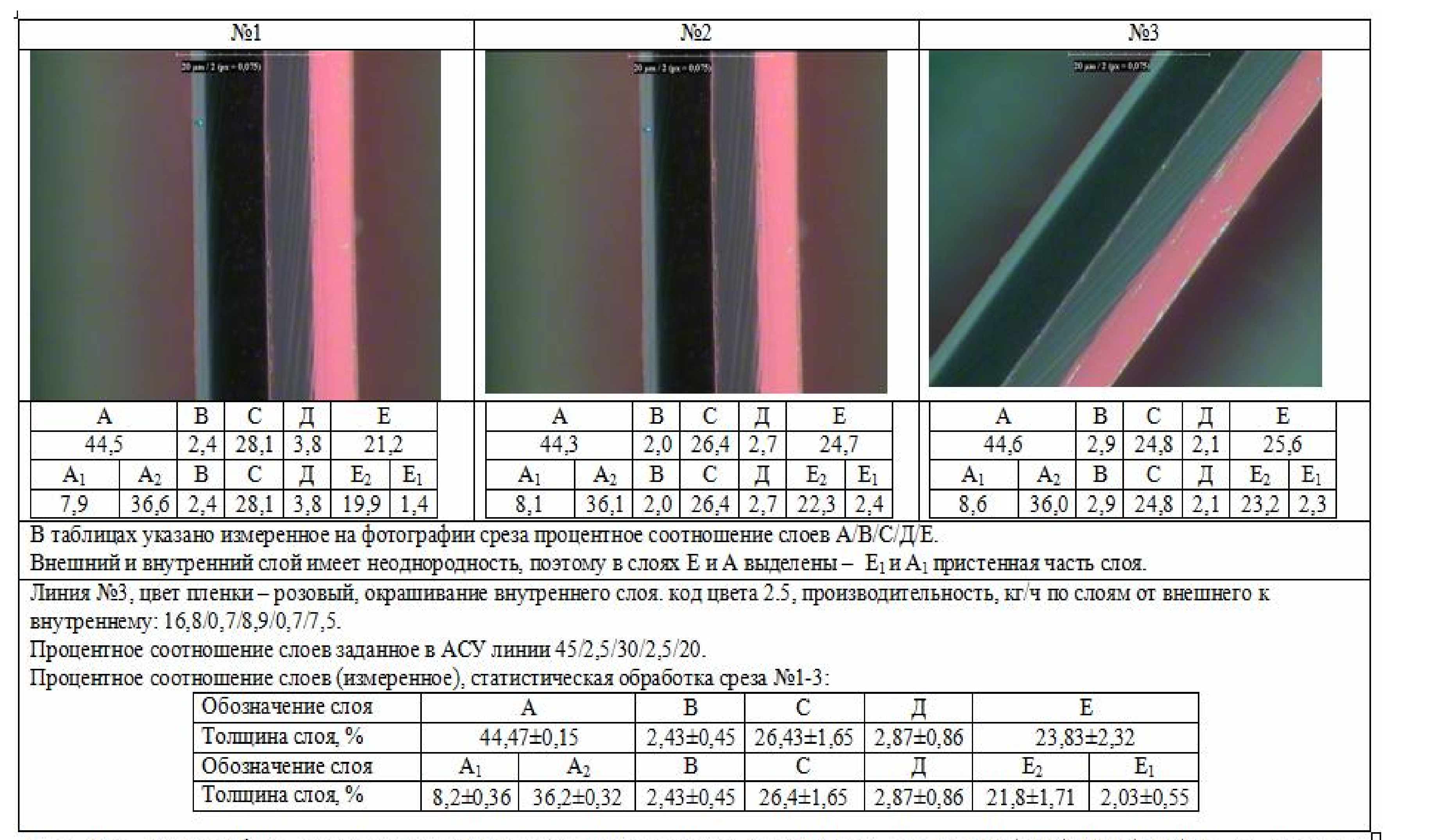
Е		Д	С	В	А	
25,8		3,5	34,3	3,0	33,3	
$Е_1$	$Е_2$	Д	С	В	$А_2$	$А_1$
4,0	21,7	3,5	34,3	3,0	27,8	5,6

В таблицах указано измеренное на фотографии среза процентное соотношение слоев Е/Д/С/В/А.
Внешний и внутренний слой имеет неоднородность, поэтому в слоях Е и А выделены – $Е_1$ и $А_1$ пристенная часть слоя.

Линия №2, цвет – бесцветный, (код цвета 8.0), производительность, кг/ч по слоям от внутреннего к внешнему: 5,5/0,5/8,4/0,5/9,8.
Процентное соотношение слоев Е/Д/С/В/А заданное в АСУ линии: 20/2,5/38,5/3,0/36.
Процентное соотношение слоев (измеренное), статистическая обработка срезов №1-3:

Обозначение слоя	Е		Д	С	В	А	
Толщина слоя, %	24,5±2,0		3,1±0,9	34,8±0,6	3,5±0,7	34,1±2,6	
Обозначение слоя	$Е_1$	$Е_2$	Д	С	В	$А_2$	$А_1$
Толщина слоя, %	3,47±0,46	21±1,76	3,1±0,87	34,8±0,57	3,5±0,7	29,9±1,98	4,13±2,29

Рис. 4.6. Фотографии бесцветной структуры пятислойного первичного рукава PA/TIE/LDPE/TIE/PA на системе видеоконтроля SVC. Приведено по 3 среза одной структуры с разной освещенностью, менялось направление света



№1	№2	№3

№1:

A		B	C	Д	E	
44,5		2,4	28,1	3,8	21,2	
A_1	A_2	B	C	Д	E_2	E_1
7,9	36,6	2,4	28,1	3,8	19,9	1,4

№2:

A		B	C	Д	E	
44,3		2,0	26,4	2,7	24,7	
A_1	A_2	B	C	Д	E_2	E_1
8,1	36,1	2,0	26,4	2,7	22,3	2,4

№3:

A		B	C	Д	E	
44,6		2,9	24,8	2,1	25,6	
A_1	A_2	B	C	Д	E_2	E_1
8,6	36,0	2,9	24,8	2,1	23,2	2,3

В таблицах указано измеренное на фотографии среза процентное соотношение слоев А/В/С/Д/Е.

Внешний и внутренний слой имеет неоднородность, поэтому в слоях Е и А выделены – E_1 и A_1 пристенная часть слоя.

Линия №3, цвет пленки – розовый, окрашивание внутреннего слоя. код цвета 2.5, производительность, кг/ч по слоям от внешнего к внутреннему: 16,8/0,7/8,9/0,7/7,5.

Процентное соотношение слоев заданное в АСУ линии 45/2,5/30/2,5/20.

Процентное соотношение слоев (измеренное), статистическая обработка среза №1-3:

Обозначение слоя	A		B	C	Д	E	
Толщина слоя, %	44,47±0,15		2,43±0,45	26,43±1,65	2,87±0,86	23,83±2,32	
Обозначение слоя	A_1	A_2	B	C	Д	E_2	E_1
Толщина слоя, %	8,2±0,36	36,2±0,32	2,43±0,45	26,4±1,65	2,87±0,86	21,8±1,71	2,03±0,55

Рис. 4.7. Фотографии окрашенной структуры пятислойного первичного рукава PA/TIE/LDPE/TIE/PA на системе видеоконтроля SVC. Приведено по 3 фотографии одной структуры с разной освещенностью, менялось направление света

4.2 Сравнительный анализ способов дозирования расплава.

Существует два подхода к обеспечению заданной многослойной структуры и соответственно к дозированию расплава при соэкструзии (рис. 4.8):

- гравиметрическое дозирование путем измерения и контроля расхода сырья $Q=f(\Delta F)$ из бункера экструдера и соответствующее управление частотой вращения шнека экструдера N_e;
- объемное дозирование расплава шестеренчатым насосом, толщина слоя обеспечивается за счет поддержания постоянной скорости вращения насоса расплава N_p, шнек экструдера при этом обеспечивает постоянство давления P_2 на входе в насос расплава путем поддержания соответствующей частоты вращения шнека N_e.

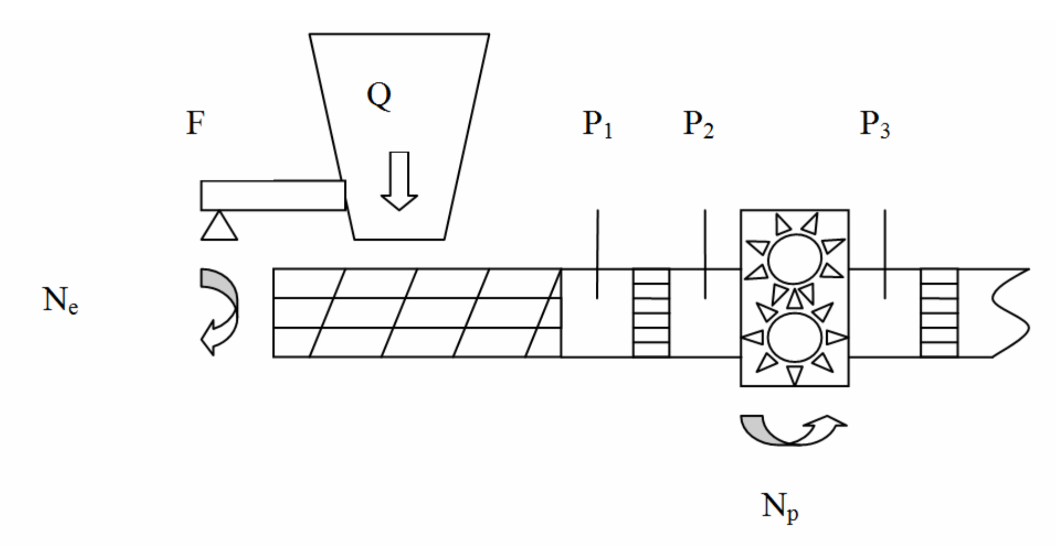


Рис. 4.8. Схема способов дозирования расплава при соэкструзии

Считается, что ограничением применения насоса расплава является усиление деградации полимера. К преимуществам насоса расплава относят прежде всего практически ровную рабочую характеристику которая не зависит от вязкости расплава.

Практические наблюдения и сравнительный анализ эксплуатации двух способов дозирования показывает что точность обеспечения заданной

производительности и соответственно толщины слоя, практически одинакова для обеих систем.

В таблице 4.7 приведены наблюдения за двумя экструдерами, диаметр шнека 30мм, работающие в одной семислойной соэкструзионной установке, но имеющих разный способ дозирования расплава. В экструдере №1 дозирование с применением насоса расплава, экструдер №1 также снабжен весовым бункером для измерения расхода сырья, но информация о расходе носит справочный характер, а управление дозированием происходит за счет насоса расплава. В экструдере №2 установлено гравиметрическое дозирование.

Общая структура PA/PA/PA/Tie/LDPE/Tie/PA номера слоев и соответственно экструдеров от внешнего к внутреннему 1///7, процентное соотношение слоев 10/10/30/5/25/5/15. Толщина слоев анализируемых экструдеров №1 и №2 по 10%, перерабатываемый материал полиамид. В таблице 4.7 приведены наблюдения стабильности производительности и давления, период наблюдения 1 час.

Таблица 4.7

Сравнительные характеристики способов дозирования расплава.

Оборудование	Давление в головке P3, Бар		Производительность, кг/ч		Температура расплава, ^{0}C	
	min	max	min	max	min	max
Экструдер №1 с насосом расплава	217,6	220,9	3,03	3,38	259,3	259,6
Экструдер №2 гравиметрическое управление	219,5	222,5	4,6	5,16	260,3	260,7

Анализ данных показывает, что стабильность трех основных показателей процесса дозирования, сопоставима для обеих экструдеров.

Наблюдения на пятислойной соэкструзионной установке для структуры PA/Tie/LDPE/Tie/PA, проведены для экструдеров подачи адгезива №2 и №4. Но здесь нет весового бункера у экструдера №2 снабженного насосом расплава,

поэтому данные о расходе не приведены (таблица 4.8). Экструдер №4 поддерживает заданное давление P2=100Бар, путем регулирования частоты вращения шнека. Период наблюдения 0,5ч

Таблица 4.8

Оборудование	Давление, экструдер-насос-головка, Бар						Температура расплава, ^{0}C	
	P1		P2		P3			
	min	max	min	max	min	max	min	max
Экструдер №2 с гравиметрическим управлением Ne=24,7об/мин	289	290			274	276	225,2	225,4
Экструдер №4 с насосом расплава Ne=22,0об/мин Np=5,3об/мин	112	116	99,9	100,1	167	169	222,7	222,9

Таблица 4.9

Период наблюдения 2ч	Давление, экструдер-насос-головка, Бар						Температура расплава, ^{0}C	
	P1		P2		P3			
	min	max	min	max	min	max	min	max
Экструдер №2 с гравиметрическим управлением Ne=25,9об/мин	299,4	301			283	286	223,6	224,8
Экструдер №4 с насосом расплава Ne=23,0об/мин Np=5,4об/мин	132	138	99,9	100,1	170	174	216,4	217,1

Анализ данных таблиц 4.8, 4.9 показывает практически одинаковую стабильность давления в головке и температуры расплава и как следствие производительности экструдеров.

Итак, с точки зрения анализа стабильности процесса дозирования, нет разницы, какую систему применить: гравиметрическую или объемную. И

кажется, что нет особого смысла усложнять конструкцию и устанавливать лишний модуль. Но практические наблюдения показывают, что применение системы экструдер-насос расплава, прежде всего наиболее оптимально в условиях многономенклатурного, единичного производства, когда постоянно (1 раз в смену) меняется рецептура продукции и/или производительность процесса.

Общеизвестно, что экструдер это два последовательно соединенных насоса. Поэтому при изменении рецептуры или производительности требуется подбор оптимального температурного профиля. Важно также учитывать противодавление в головке, чтобы не было значительного увеличения «противотока», что вызывает перегрев расплава за счет увеличения сил внутреннего трения.

Применение системы экструдер-насос расплава разделяет задачи подготовки расплава и его подачи в головку. Экструдер работает со стабильным давлением на выходе, давление небольшое (менее 120Бар), поэтому «противоток» в экструдера стабильный и небольшой. Основная задача экструдера обеспечить плавление гранул и подачу расплава с небольшим давлением. При этом автоматическое регулирование оборотов шнека в пределах ±5об/мин, для стабилизации давления на входе в насос, не приводит к пульсации расплава, так как насос выравнивает рабочую характеристику.

Отдельно необходимо отметить, что никакого усиления деградации расплава в насосе не происходит. Во всяком случае, автор неоднократно наблюдал как раз обратный эффект: при экструзии термочувствительных полимеров, технологическим процессом сложнее управлять, когда нет насоса расплава. Вероятно, что основная причина это влияние противодавления на движение расплава в экструдере.

Следует отметить, что речь идет о сравнении стабильности технологического процесса в течении достаточно длительного времени от недели до месяца. Если пытаться сравнить процессы даже в течении нескольких часов (после чистки экструдера и головки) то разница будет

незаметна. Но когда меняются партии сырья, операторы, происходят замены сеток расплава, проводятся переходы по номенклатуре, ремонты на линии, линия периодически находится в остановленном состоянии (когда экструдер стоит на небольших оборотах) - применение насоса расплава снижает уровень отходов, повышает стабильность производительности и стабильность качества продукции.

Как было показано в Разделе №3 представление движения расплава в виде пробки позволяет более точно описать реологическую кривую, рассчитать многослойное течение, рассчитать движение расплава в зоне дозирования шнека.

Постоянное и низкое противодавление на выходе из экструдера позволяет стабилизировать пристенную вязкость и время пребывания материала в экструдере.

При отсутствии насоса расплава, увеличение противодавления (например из-за засорения сеток) приводит к усилению пристенного трения, точечному перегреву расплава на поверхности шнека и усилению его деградации, таким образом процесс деградации «лавинообразно» усиливается с ростом засорения сеток.

В таблице 4.10 приведены практические результаты наблюдения за работой двух систем дозирования при соэкструзии одинаковых пятислойных структур при широкой номенклатуре выпускаемой продукции.

Таблица 4.10

Сравнительный анализ способов дозирования расплава

№ п/п	Гравиметрическое дозирование шнеком экструдера.	Объемное дозирование насосом расплава.
1	2	3
1	Требует подбора температур экструдера в зависимости от рецептуры и производительности.	Регулирование температур проводится только при необходимости устранить непроплавы или деструкцию сырья.
2	Более широкий диапазон температур по зонам экструдера. Например для экструзии слоя LDPE диапазон составляет 200-245С.	Более узкий диапазон температур по зонам экструдера. Например для экструзии слоя LDPE диапазон составляет 220-240С.
3	Требует сложных профилей температур по зонам экструдера.	Достаточно применения ровного температурный профиля по зонам экструдера
4	Пульсация подачи расплава равна объему витка шнека.	Пульсация подачи расплава равна объему камеры образованной двумя зубьями (меньше в 10-20раз чем объем витка шнека)
5	Работа в более узком диапазоне вязкостей рецептур. При работе с рецептурами с различной вязкостью, например при использовании различных красителей и варьировании процента их ввода в рецептуру, требуется оптимизация температурного профиля экструдера для каждой рецептуры.	Стабильная подача расплава во всем диапазоне вязкотекучего состояния полимера, работа в максимально широком диапазоне вязкостей.

Продолжение таблицы 4.10

1	2	3
6	Более требовательна к износу экструдера. Так как экструдер работает с более высоким давлением, царапины на поверхности шнека, подгоревший расплав на шнеке, могут приводить к нестабильной подаче расплава.	Более требовательна к износу насоса. Так как экструдер создает небольшое давление, дефекты на поверхности шнека или цилиндра не приводят к снижению качества дозирования системы экструдер-насос.
7	Требуется один датчик давления расплава.	Требуется три датчика давления расплава.
8	Время промывки экструдера 45мм (PA6 или LDPE) при переходе по цвету – 10мин, количество отходов – 5кг.	Время промывки экструдера 45мм (PA6 или LDPE) при переходе по цвету – 10мин, количество отходов – 5кг.

Итак применение системы экструдер-насос расплава более предпочтительно в условиях единичного производства.

4.3 Исследование переходов по цвету (рецепту).

Переходы по цвету занимают ключевую роль в процессах переналадок так как задействуют все оборудование (подготовка рецепта – экструдер - вторичное формование), наиболее длительные, сложно прогнозируемы по возникающим отходам.

Если максимальное число переходов по толщине и размерам рукава может достигать 7 переходов в смену, то по цвету допускают максимум 2п/см (для установок с производительностью 30-60 кг/ч).

Нормы на переходы между видами, цветами и калибрами определяются статистически, при этом учитывается номинальная производительность оборудования и среднее время одного перехода.

Исходные данные по расходу сырья на переход по цвету закладываются в характеристики экструзионного оборудования. Например если массовая производительность 100кг/час и максимальное время на промывку для нового

оборудования составляет 15минут, потери сырья на переход 25кг. Но это ориентировочная цифра, так как не учитывает специфики применяемого сырья и постепенное «засорение» каналов течения расплава, что понемногу увеличивает потери при одном и том же переходе, опыт работы обслуживающего персонала, систему ТО и ППР предприятия.

Нормы можно представить в виде таблицы 4.11, где в ячейках указаны потери времени или сырья при переходе между всеми цветами продукции, индекс показывает направление перехода (от какого и к какому цвету происходит переход). Необходимо отметить, что таблица несимметрична, то есть между переходом с цвета №1 на цвет №2 и переходом с цвета №2 на цвет №1 может быть существенная разница, поэтому для каждой очереди заказов существует оптимальная последовательность их изготовления.

Таблица 4.11

Форма таблицы потерь (отходов) при переходах

Цвет	Вид №1	Вид №2	Вид №3
Вид №1	0	X12	X13
Вид №2	X21	0	X23
Вид №3	X31	X32	0

Аналогичные таблицы разрабатываются для всех цветов и диаметров продукции внутри каждого вида. В упрощенном варианте учета возможно усреднение по всем переходам, но это зависит и от разброса фактических значений отходов от среднего и от требований принятой системы учета и планирования производства.

Следует отметить, что фактические отходы даже для одного и того же перехода имеют достаточно широкий диапазон варьирования, например при норме X_{12} =10кг фактические отходы могут лежать в диапазоне 6-14кг (зависит от состояния оборудования, опыта персонала, предыдущего количества и сложности различных переходов). Для наиболее сложной промывки с темного цвета (например коричневого) на бесцветную, при норме 30кг, фактические отходы могут составить и 100кг. Понятно что такое значительное отклонение от нормы имеет причины и требует проведения корректирующих мероприятий, но для системы планирования производства такое нарушение приводит к

значительному снижению точности прогнозирования выполнения сменного задания и как следствие к срывам сроков выполнения заказов. Поэтому требуется ежесменная оценка выполнения установленных нормативов отходов, анализ причин отклонений, и разработка и проведения корректирующих мероприятий для повышения точности прогнозирования выполнения установленных нормативов отходов.

4.3.1 Исследование влияние минерального наполнителя и соотношения вязкостей расплавов при переходе по цвету

Описание перехода:

- средний слой замена рецептуры с коричневым красителем на рецептуру с синим;
- внутренний слой замена бесцветного слоя на белый.

Скорость вращения шнеков постоянна. Время между образцами №1 и №6 – 6 минут.

Таблица 4.12

Технологические режимы первичного формования в процессе перехода

Параметр	C (LDPE)	E (PA6)
N, об/мин	100	50
Q, кг/час	20	17
Температура расплава, ^{0}C	240	250

В процессе замены цвета мы наблюдаем (рис. 4.11) как вымывается копильник спирального типа с 8 распределителями с условным диаметром 7 мм (рис глава о распределителях).

Анализ процесса вымывания среднего слоя (переход коричневый - синий).

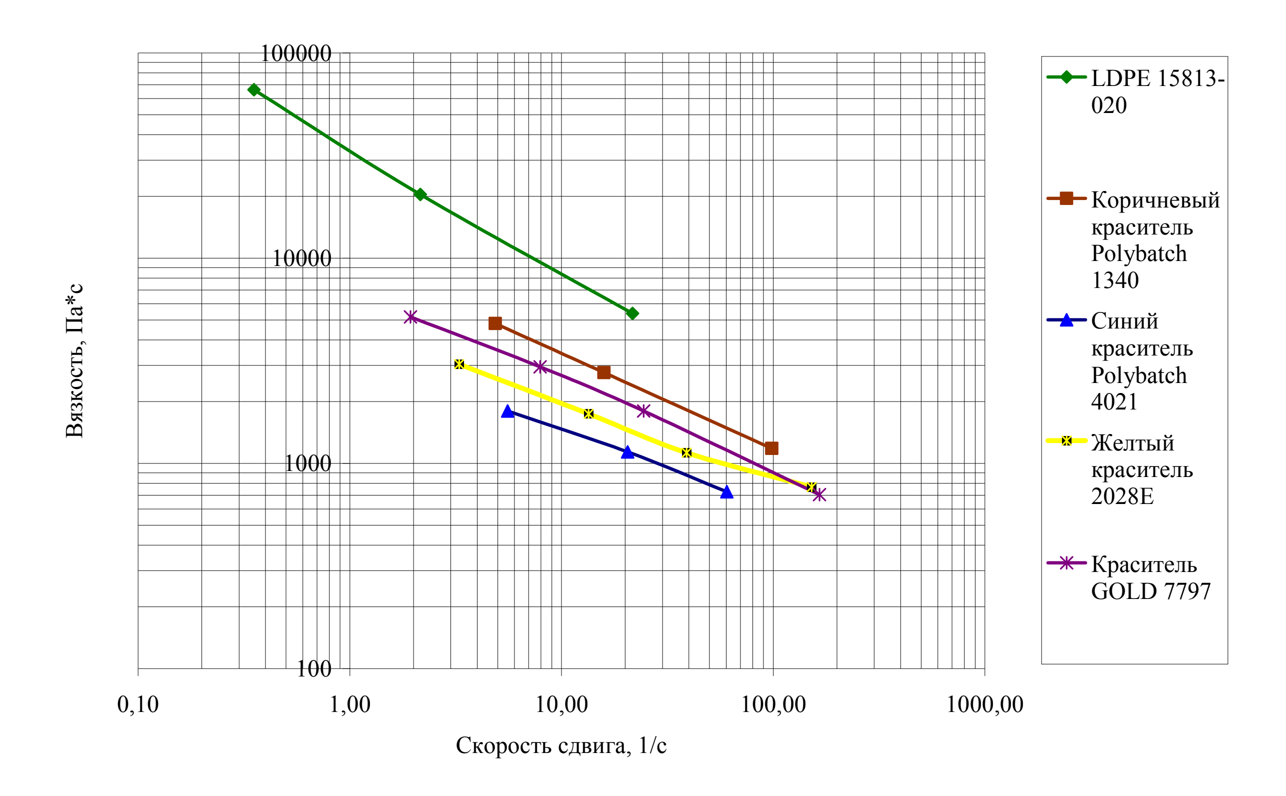


Рис. 4.9. Реологические характеристики исследуемых материалов среднего слоя

Вязкость смеси рассчитаем по уравнению [52]:

$$\lg \mu_c = M_1 \lg \mu_{k1} + M_2 \lg \mu_{k2} ,$$

где

μ_c – вязкость смеси, μ_{k1} – вязкость компонента 1, μ_{k2} – вязкость компонента 2, M_1 массовая доля компонента 1, M_2 массовая доля компонента 2.

Таблица 4.13

Реологические характеристики компонентов и смесей среднего слоя.

Наименование компонента	Вязкость при скорости сдвига $10 с^{-1}$	ПТР ($150^0 C$, 4,9кг), г/10мин	Процентный состав среднего слоя (рецепт)	
			Коричневый	Синий
Полиэтилен LDPE 15813-020	8000	1,1	79%	76%
Коричневый краситель Polybatch 1340	2500	7,9	21%	-
Синий краситель Polybatch 4021	1500	30,1	-	24%
Вязкость смеси μ_{c}, Па*с	-	-	6266	5353

№ образца	Фото структуры	Описание промывки
1		Начало замены цвета среднего слоя, внутренний без изменений
2		Цвет среднего слоя поменялся на 80%, Внутренний без заметных изменений цвета
3		Цвет среднего поменялся на 90%, но внешний вид (см. рис. 4.11) изменился на 30%) Внутренний имеет белесость (около 5% белого цвета)
4		Цвет среднего поменялся на 95% Внутренний имеет белесость (около 5% белого цвета)
5		Цвет среднего поменялся на 99% Цвет внутреннего (около 90% белого цвета)
6		Цвет среднего поменялся на 100% Цвет внутреннего 100% белого цвета.

Рис. 4.10. Окрашивание слоев в процесс перехода при замене цвета

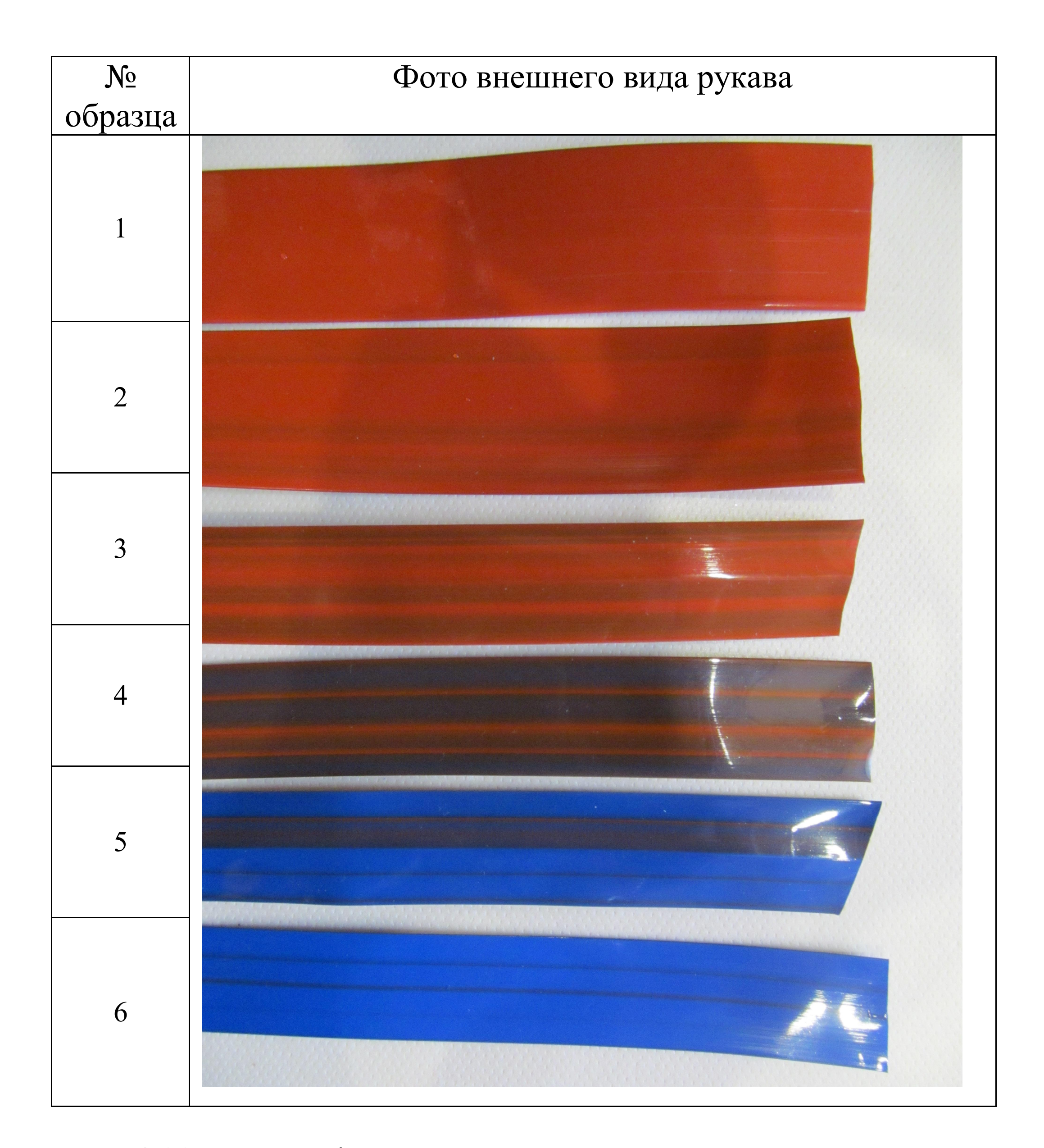
№ образца	Фото внешнего вида рукава
1	
2	
3	
4	
5	
6	

Рис. 4.11. Фотографии внешнего вида рукава в процессе перехода по цвету. № образца рис 4.11 соответствует № образца рис. 4.10

Анализ срезов многослойного рукава при промывке (рис. 4.10) показывает следующие закономерности: при подаче менее вязкого расплава в головку с более вязким расплавом течение ближе к сдвиговому, расплав постепенно вытесняет более вязкий расплав из головки (вымывание синим цветом коричневого). Можно представить что высоковязкий расплав как бы формирует для низковязкого более узкий канал, сам при этом прилипает к стенкам канала поэтому низковязкому расплаву сложнее вымыть более вязкий расплав.

4.3.2 Анализ процесса вымывания внутреннего слоя (с бесцветного на белый)

Таблица 4.14

Рецептура внутреннего слоя

Цвет	PA6	PA6/66	Anti-block	Суперконцентрат белого красителя
Бесцветный	87	10	3	-
Белый	65	10	-	25

Относительная вязкость (в 96% H_2 SO_4) полиамидов и полиамидной основы добавок – 3,3-3,8.

Суперконцентрат белого красителя содержит 60% TiO_2, то есть итоговая смесь является высоконаполненной композицией, для которой характерно пробковое течение [52]. Анализ срезов многослойного рукава показывает в процессе промывки высоконаполненная композиция, по всей толщине слоя постепенно меняет свой цвет (с бесцветного на белый). То есть изменение цвета смеси происходит в экструдере при смешивании двух цветов и это изменение смеси сразу видно по всей толщине слоя и поэтому промывка происходит быстрее. Минеральный наполнитель (двуокись титана) усиливает скольжение расплава что приводит к пробковому характеру замены одного слоя на другой.

Если сравнить между собой время перехода по двум слоям, то переход коричневый-синий занимает в 1,5-2 раза больше времени чем переход бесцветный-белый. Конечно следует учитывать что белый слой является подложкой и синий цвет очень насыщенный и яркий, поэтому общее окончание перехода определяет прежде всего синий цвет. Небольшие полосы прозрачного внутреннего слоя просто могут быть не заметны, но все таки срез структуры показывает, что течение и характер замены различаются.

4.3.3 Исследование перехода по цвету (с желтого на бесцветный) при варьировании скорости шнеков

Описание перехода:

- средний слой С - замена рецептуры с желтым красителем на бесцветную;
- внутренний слой Е - замена белого слоя на бесцветный.

Таблица 4.15

Реологические характеристики компонентов и смесей среднего слоя

Наименование компонента	Вязкость при скорости сдвига $10 c^{-1}$	ПТР (150^0С, 4,9кг), г/10мин	Процентный состав среднего слоя (рецепт)	
			Желтый	Бесцветный
Полиэтилен LDPE 15813-020	8000	1,1	75%	100%
Желтый краситель Yellow 2028E	2000	6,69	25%	-
Вязкость смеси μ_c, Па*с	-	-	5656	8000

Таблица 4.16

Технологические режимы первичного формования в процессе перехода

Время, Ч-мин	Параметры	A	C	E
10-35	N, об/мин	50	68	33
	I, A	22	13	6
	Q/N, кг/60об	0,43	0,17	0,24
10-55	N, об/мин	25	92	90
	I, A	13	13	10
	Q/N, кг/60об	0,37	0,16	0,25
10-59	N, об/мин	25	80	100
	I, A	14	14	14
	Q/N, кг/60об	0,38	0,16	0,25
11-23	N, об/мин	54	75	39
	I, A	25	12	7,1
	Q/N, кг/60об	0,43	0,16	0,25

№ образца	Фото структуры в процессе перехода по цвету	Время	A	C	E	Примечания
0	-	10-35	50	68	33	Стандартные значения скоростей шнеков
1		10-37	30	92	70	Начало промывки, интенсивный желтый цвет среднего слоя и белый внутреннего слоя
2		10-41	25	92	80	Обесцвечивание среднего слоя (желтый меняется на бесцветный) и обесцвечивание внутреннего (белый меняется на бесцветный)
3		10-42	25	92	80	Желтый цвет явно виден в слое. Видна белая полоса
4		10-45	25	92	90	Видны желтые полосы (остатки желтого красителя)
5		10-47	25	92	90	Видны белые полосы, также остатки желтого цвета
6		10-50	25	92	90	Еще виден белый цвет
7		11-02	25	80	100	Белого почти не видно, белесость, матовость внутреннего слоя
8		11-16	53	75	48	Почти прозрачная структура, начало наладки вторичного формования

Рис. 4.12. Изменение цвета слоев в процессе перехода (с 11-16 по 11-23 наладка вторичного формования).

Многослойная структура исследована в привязке к заданной скорости процесса, времени и расходу сырья.

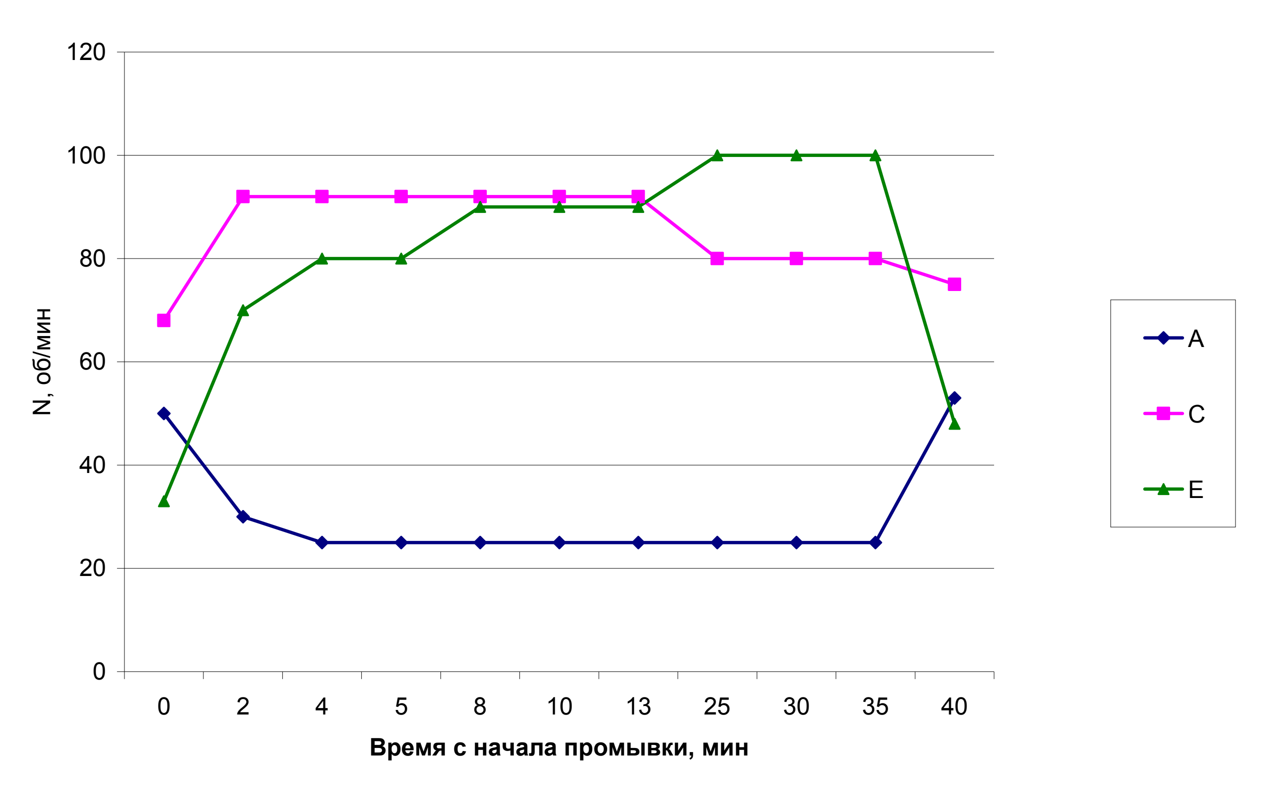
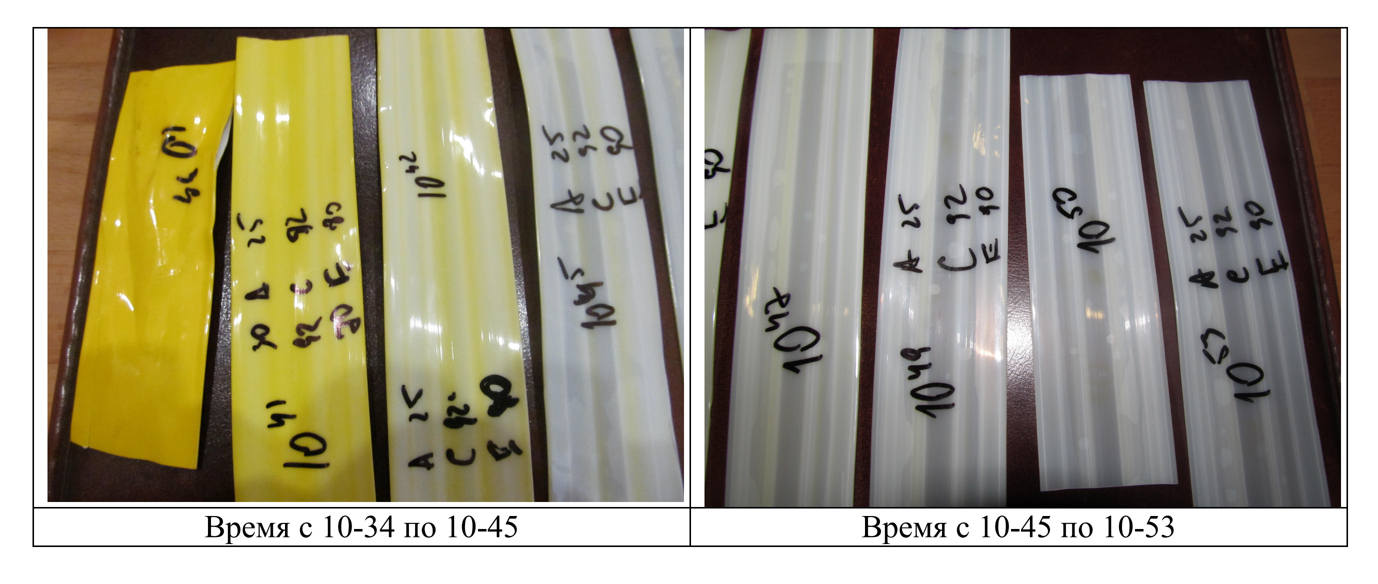
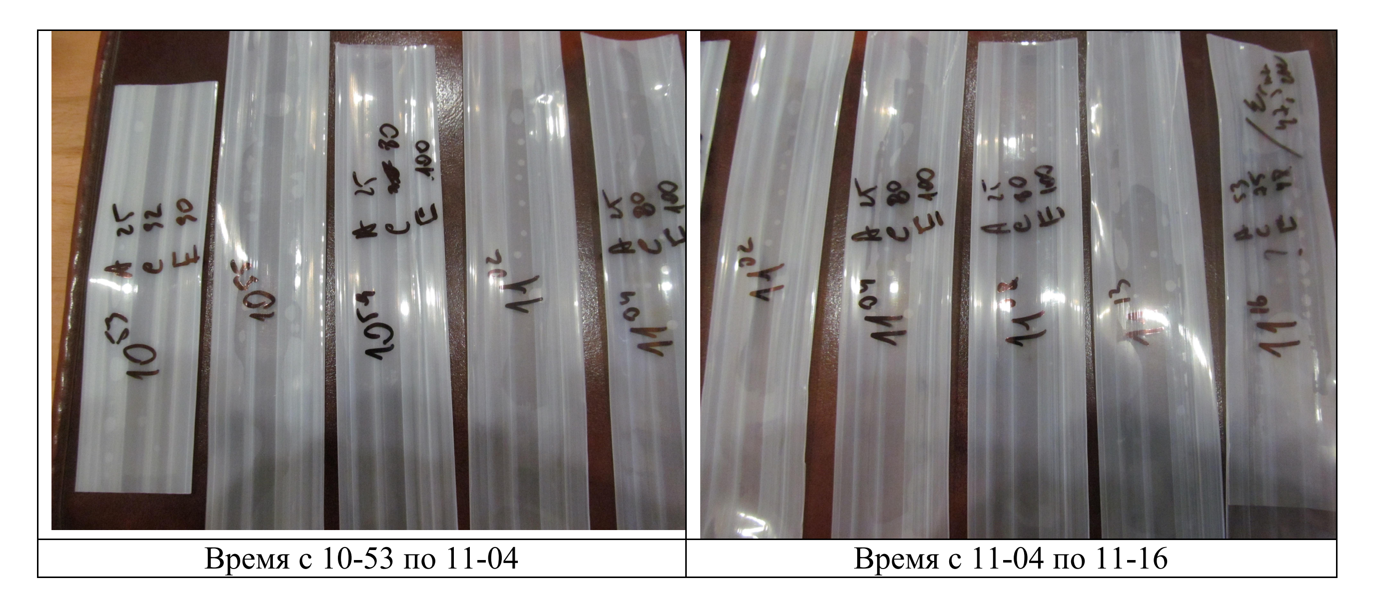


Рис. 4.13. Управление скоростью вращения шнеков при переходе по цвету с желтого на бесцветный.



Время с 10-34 по 10-45	Время с 10-45 по 10-53

Рис. 4.14. Внешний вид рукава в процессе перехода, на образцах указано время отбора и скорости вращения шнеков



Время с 10-53 по 11-04	Время с 11-04 по 11-16

Рис. 4.15. Внешний вид рукава в процессе перехода, на образцах указано время отбора и скорости вращения шнеков

Таблица 4.17

Взаимосвязь расхода сырья и процента изменения цвета слоя С

Время, ч-мин	Время накопительно, мин	Процент остатков цвета	Расход сырья накопительно	Примечание
10-37	0	100	0	Вымывание ~97% цвета
10-41	4	50	0,84	
10-42	5	10	1,05	
10-45	8	3	1,68	Вымывание пристенного слоя ~3%
10-47	10	2	2,1	
10-50	13	1	2,73	
11-02	25	1	5,25	
11-16	39	0	8,19	-

На рис. 4.12 и 4.14 слой желтого цвета вытесняется бесцветным, который имеет более высокую вязкость.

Для перехода желтый - бесцветный характерно, что рецепт желтого цвета вымывается более вязким бесцветным рецептом, поэтому наблюдается пробковый характер промывки.

Для промывки с белого на бесцветный характерно два фактора усложняющих промывку, во первых в бесцветном рецепте нет минерального наполнителя и его течение ближе к сдвиговому, что ухудшает условия для выдавливания белого слоя, во вторых промывка на бесцветную композицию требует максимально качественной промывки, что увеличивает время и отходы

(рис. 4.15). Итак, в результате исследований в производственных условиях установлено, что наиболее сложная промывка при переходе с окрашенной пленки на бесцветную, происходит в три этапа. На первом этапе цвет исчезает на 90% в течении 10 мин. Второй этап занимает достаточно длительное время – 30мин. При этом цвет практически исчезает, на просвет пленка прозрачная, но наблюдается некоторая степень окрашивания в массе пленки (рулон, бобина). Третий этап – это полная промывка, когда экструдируется полностью бесцветная пленка (табл. 4.18).

Таблица 4.18

Результаты наблюдений за промывкой соэкструзионной установки, переход на бесцветную рецептуру

Стадии перехода	Степень изменения цвета, %	Время промывки, мин	Общее время, мин	Уровень качества по соответствию цвета
Основная	0 – 90	10-15	10-15	Низкий
Дополнительная	90 – 99	30-40	40-55	Хороший
Окончательная	99 – 100	30-40	70-95	Отличный

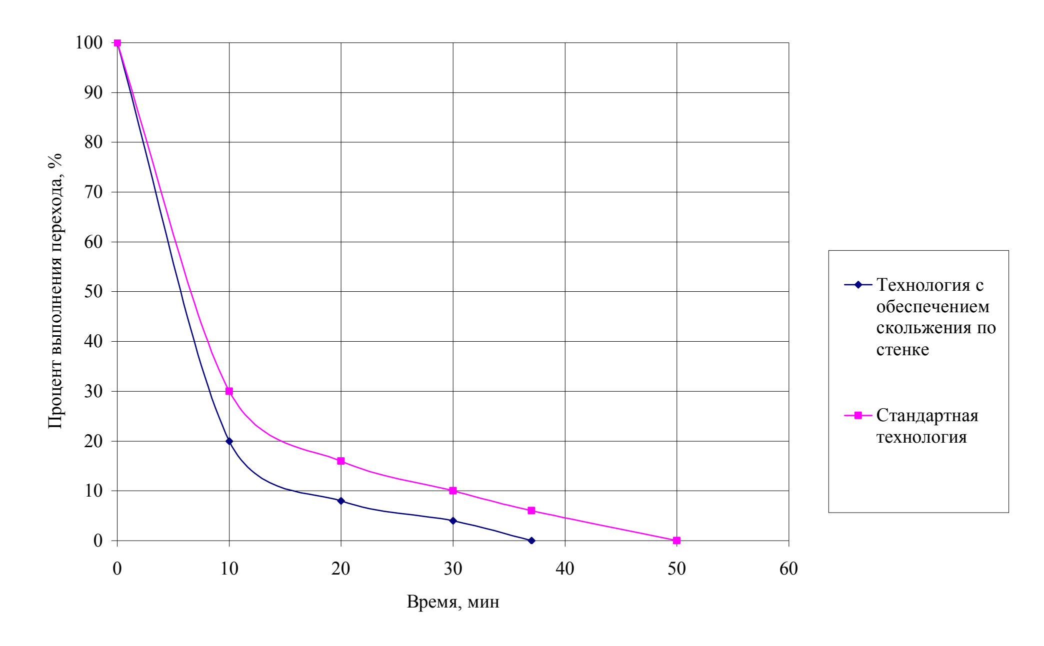


Рис 4.16. Динамика процесса замены рецепта в зависимости от скольжения на стенке канала

На рис. 4.16 показана динамика изменения интенсивности цвета для разных условий течения расплава за счет применения процессинговых добавок.

4.3.4 Исследование перехода по цвету (с золотого на бесцветный) при варьировании скорости шнеков

Описание перехода:

- средний слой замена рецептуры с золотым красителем на бесцветную;
- внутренний слой замена белого слоя на бесцветный.

Таблица 4.19

Реологические характеристики компонентов и смесей среднего слоя

Наименование компонента	Вязкость при скорости сдвига $10c^{-1}$	ПТР (150С, 4,9кг), г/10мин	Процентный состав среднего слоя (рецепт)	
			Желтый	Бесцветный
Полиэтилен LDPE 15813-020	8000	1,1	80%	100%
Краситель GOLD 7797 (золотой)	2700	3,95	20%	-
Вязкость смеси $\mu_{c,}$ Па*с	-	-	6437	8000

№п/п	Фото пятислойной структуры	E	C	A	Примечание
0	-	25	40	50	Стандартные значения скоростей шнеков
1		25	60	20	Увеличение скорости промывки среднего слоя золотого цвета
2		25	60	20	Промывка среднего слоя
3		25	60	20	Промывка среднего слоя
4		20	80	15	Промывка среднего слоя
5		20	80	15	Промывка среднего слоя
6		40	80	15	Промывка среднего слоя, усиление промывки внутреннего слоя
7		80	40	15	Промывка внутреннего слоя
8		80	40	15	Промывка внутреннего слоя
9		80	40	10	Промывка внутреннего слоя
10		40	80	10	Промывка среднего слоя
11		25	40	50	Переход на стандартные скорости шнеков

Рис. 4.17. Изменение цвета слоев при переходе с цвета золотой на бесцветный

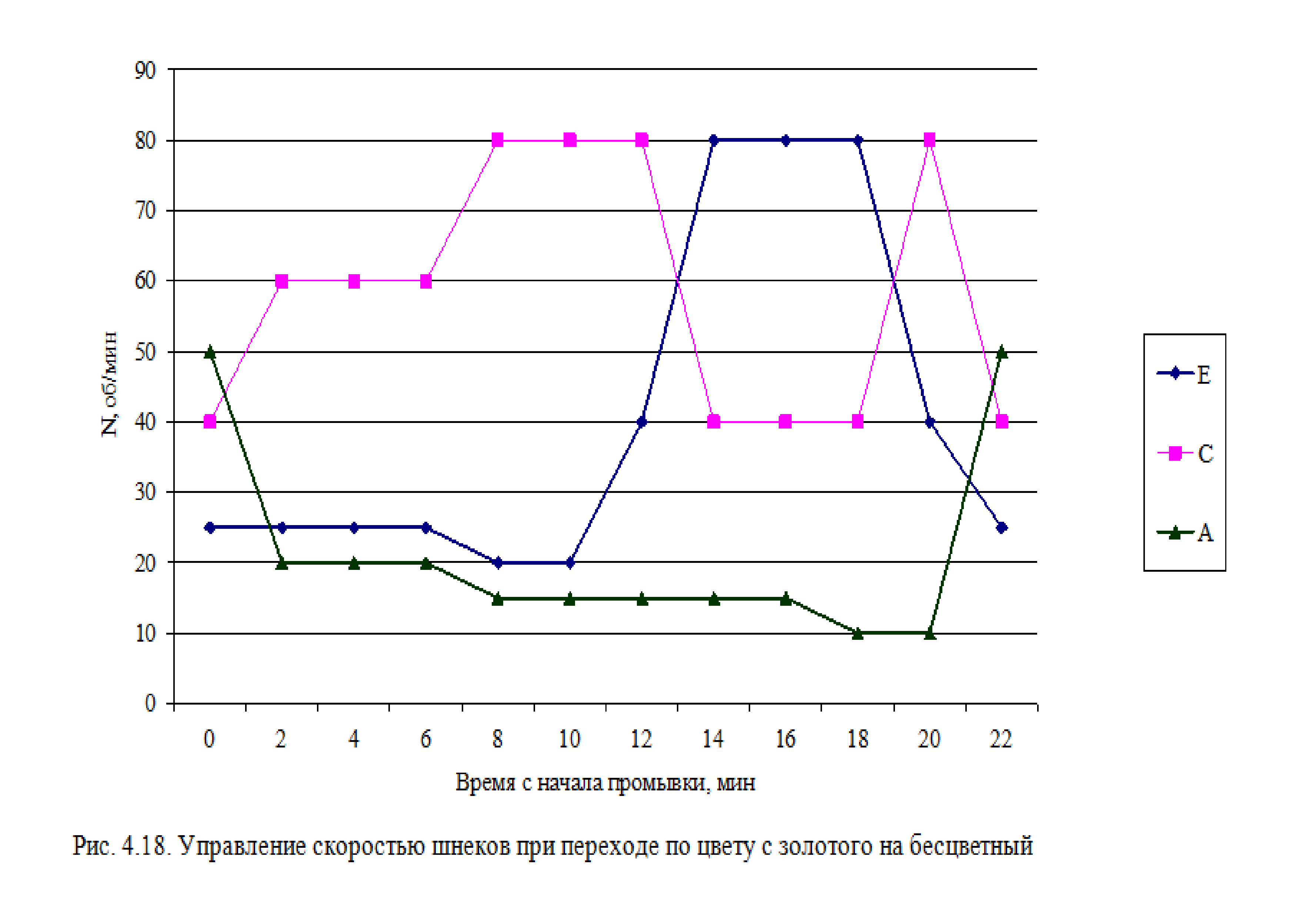
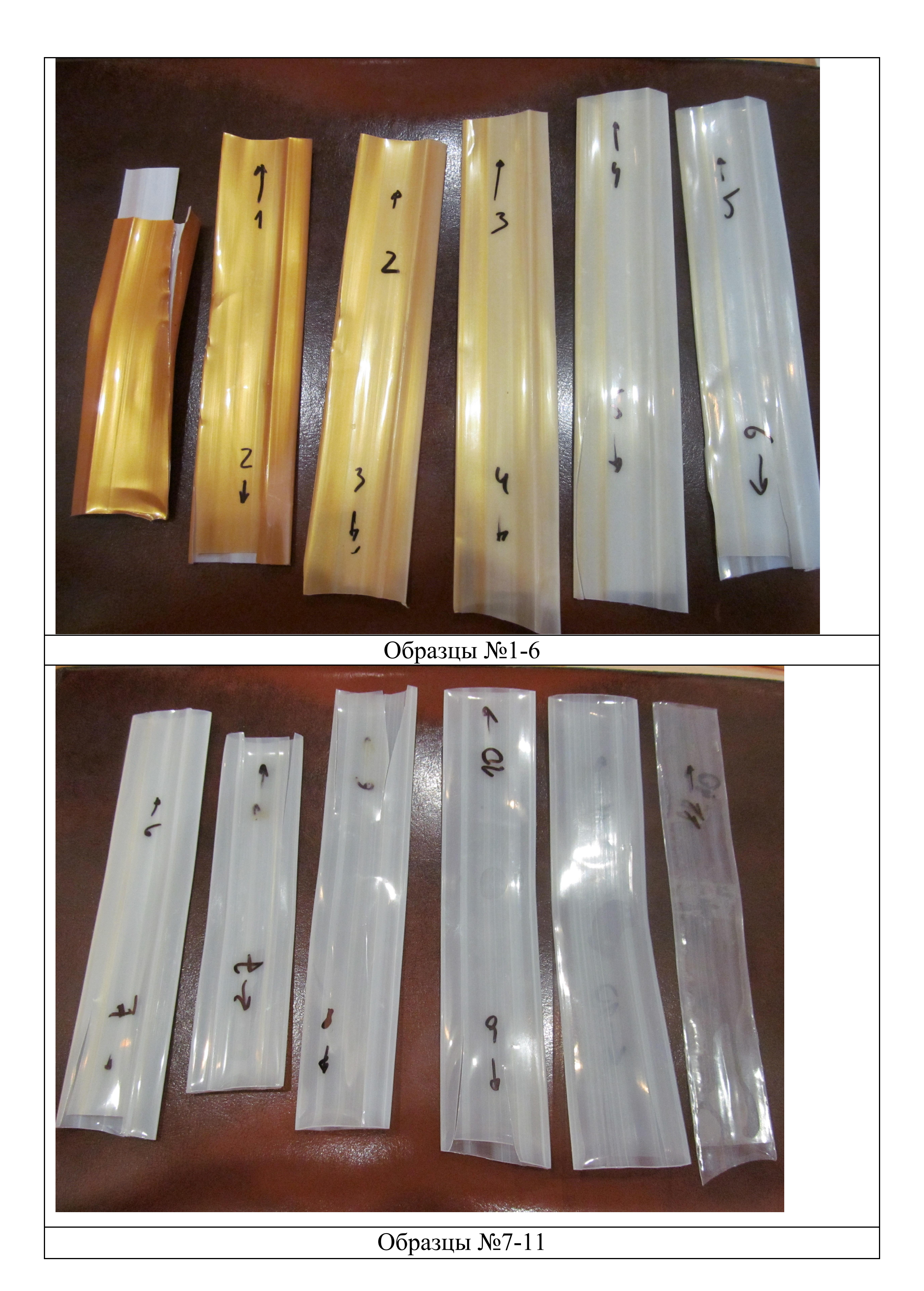


Рис. 4.18. Управление скоростью шнеков при переходе по цвету с золотого на бесцветный



Образцы №1-6

Образцы №7-11

Рис. 4.19. Внешний вид рукава при переходе по цвету от золотого к бесцветному, цифра на образце соответствует номеру фото структуры рис. 4.17

На рис 4.19 слой золотого цвета вытесняется бесцветным, который имеет более высокую вязкость. Характер течения аналогичен предыдущему исследованию так как рецепт золотого цвета вымывается более вязким бесцветным рецептом, поэтому наблюдается пробковый характер промывки.

Отдельно необходимо выделить проблемы вымывания «полос» (образцы №7-10). В каналах соэкструзионной головки из-за ее износа или постепенного пригорания расплава образуются застойные зоны, поэтому в них снижается скорость течения и накапливается расплав текущего цвета. Поэтому для упрощения закрашивания предыдущего цвета желательно последовательность переходов выстраивать по принципу от светлого к темному (от белого к черному), чтобы когда вымывается более светлый слой, темному легче было его закрасить. Также важно подобрать оптимальную геометрию распределительных каналов головки, чтобы объем каналов течения имел минимально необходимый уровень для обеспечения максимально высоких скоростей течения (см. Раздел №3)

Интересным является следующее практическое наблюдение, когда соэкструзинная линия последовательно изготавливала различные интенсивно окрашенные пленки (с содержанием 15-25% суперконцентрата красителя в отдельных слоях), а затем перешла на длительное изготовление бесцветной пленки, то она как бы «вспоминает» предыдущие цвета в обратном порядке. Окрашивание очень слабое, его видно только «в массе» то есть в рулоне, когда много витков пленки наложено друг на друга, отдельные участки пленки видимого цвета не имеют. Причем вроде бы промывка на бесцветную пленку уже закончилась, но окрашивание происходит через несколько часов работы на бесцветном рецепте. Это говорит о том что пристенный слой может вымываться не сразу, также это сигнал о значительном износе внутренней поверхности экструдера и головки.

4.4 Особенности планирования переходов и очереди заказов

Согласно исследований [82] функционирования гибких производственных систем (ГПС), на детерминированность или стохастичность системы массового обслуживания (СМО) влияет:

1. Коэффициент закрепления операций.
2. Коэффициент загрузки обслуживающих подсистем.
3. Режим поступления заказов на производство.

Анализ условий функционирования современного многономенклатурного соэкструзионного производства показывает, что такую производственную систему необходимо отнести к стохастическим системам массового обслуживания, по причине неустойчивого характера поступления заказов в производство. То есть нет ритмичности в объеме и в номенклатуре поступающих заказов.

Важными особенностями технологического процесса являются следующие факторы:

1. Несимметричность таблиц переходов между видами, цветами, типами продукции.
2. Переход не только занимает время и снижает производительность, но и приводит к отходам.

Наличие первого фактора приводит к тому что всегда существует одна оптимальная последовательность прохождения заказов.

Наличие второго фактора приводит к тому что существует минимальный объем для одной номенклатуры продукции при постановке ее в план производства, и минимальный объем очереди заказов для загрузки одной производственной линии, поскольку отходы интенсивно возрастают при снижении очереди ниже некоторого критического значения. Такая зависимость для производственной линии с производительностью до 80кг/ч, для общего возможного количества типоразмеров продукции 25500 (см табл. 1.9) и показана на рис 4.19 .

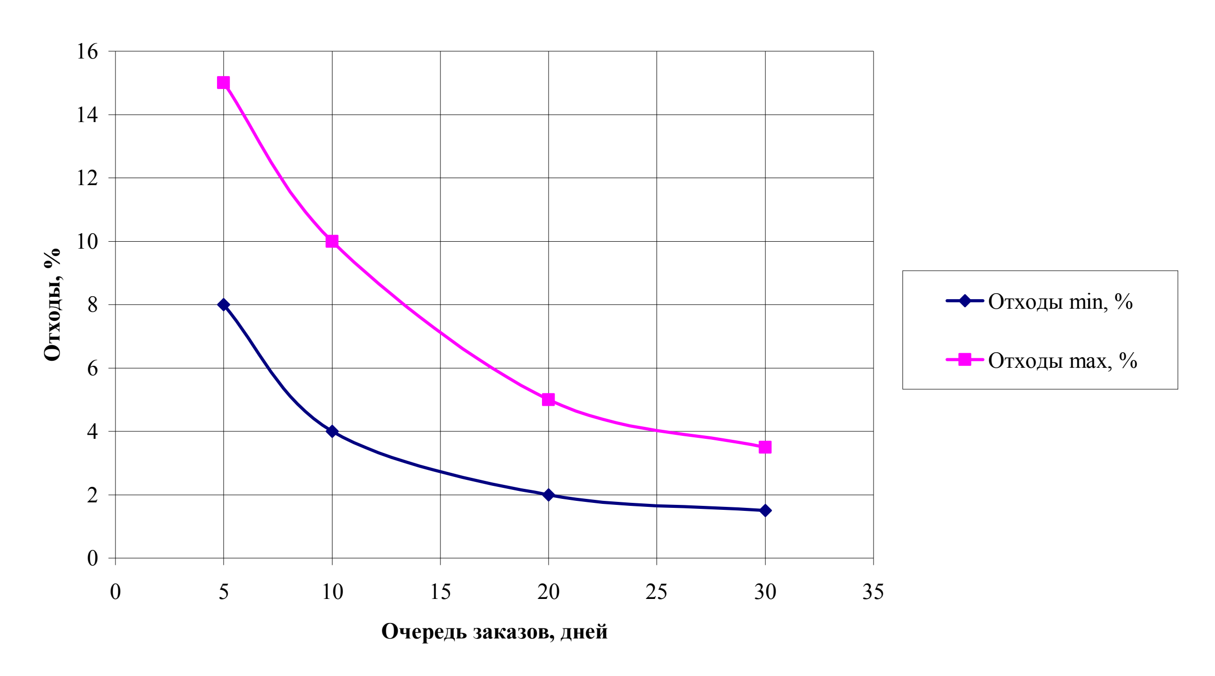


Рис. 4.20. Типичная зависимость уровня потерь от очереди заказов в многономенклатурном соэкструзионном производстве [83].

Следует отметить, что 40-50% всех объемов поступающих заказов занимает 3-5 ходовых диаметров и 5-8 цветов продукции то есть 15-40 типоразмеров, что составляет меньше 1% от всех возможных типоразмеров продукции.

В то же время даже незначительное повышение отходов, например с 4% до 8% приводит к существенной загрузке операторов линии на дополнительные работы по наладке линии, уборке и сортировке отходов, подготовке производственных отчетов. Таким образом уменьшается время на повышение стабильности процесса и подналадку линии, улучшение качественных характеристик продукции в течении смены.

Поэтому наиболее рациональная стратегия планирования заключается в том, что в поступающий поток заказов добавляются ходовые типоразмеры в объеме 20-25% от объема всей очереди заказов для снижения отходов, повышения загрузки производственных мощностей и формирования складских запасов для снижения сроков выполнения по наиболее ходовым позициям продукции. Ходовые позиции могут меняться, поэтому необходим

ежемесячный анализ и возможно пересмотр перечня типоразмеров которые изготавливаются без наличия конкретных заказов на продукцию.

Теперь рассмотрим факторы влияющие на определение периода формирования очереди заказов. Понятно что, чем больше период, за который собираются заказы тем больше вероятность, что поступят близкие цвета, виды и калибры и появляется больше возможностей провести группировку и оптимизировать очередь (минимизировав отходы). Но ограничением являются сроки изготовления заказа, которые формируются рынком, так как максимальный срок изготовления любого заказа это период формирования очереди умноженный на два.

И здесь возникает очень сложный вопрос, каким образом сопоставить (сравнить) свою продукцию: по качеству, количеству номенклатур и себестоимости с конкурентом. Без такого сравнения нельзя сравнивать и сроки, например можно изготавливать 2 цвета и 2 диаметра и иметь их постоянно в наличии на складе, сократив таким образом, сроки до времени транспортировки. Другой вариант работать по конкретным заказам, имея в ассортименте тысячи номенклатур продукции и максимально удовлетворяя клиентов по ассортиментному ряду продукции, но в этом случае сроки значительно увеличиваются, начинает влиять наличие ассортимента сырья и сроки его поставки, наличие и готовность всего оборудования и персонала.

4.4.1 Анализ требований к заказу при постановке его в очередь

Следующей задачей при планировании является анализ каждого заказа в очереди на предмет его себестоимости для оценки возможности его производства (в рамках текущей очереди) и анализ отходов в разрезе каждого клиента.

Итак, очередь заказов содержит сроки и уровень потерь при ее выполнении.

Таблица 4.21

Очередь заказов в порядке их поступления (неоптимизированная)

Дата поступления (номер заказа)	Номенклатура	Объем, км	Объем, кг	Потери на переход, кг	Потери на переход, %
10	Цвет №1	50	500	10	2,0
15	Цвет №3	1	10	20	66,7
20	Цвет№2	1	10	30	75,0
25	Цвет №1	50	500	20	3,8
-	Всего	102	1020	80	7,3

После поиска вариантов прохождения заказов (табл. 4.22). Проводится группировка и оптимизации очереди, далее проводится анализ каждого заказа..

Таблица 4.22

Нормы отходов при переходах между цветами пленки

	Цвет №1	Цвет №2	Цвет №3
Цвет №1	*0*	*10*	*20*
Цвет №2	*20*	*0*	*10*
Цвет №3	*10*	*30*	*0*

Таблица 4.23

Очередь заказов оптимизированная

Дата поступления (номер заказа)	Номенклатура	Объем, км	Объем, кг	Потери на переход, кг	Потери на переход, %
10	Цвет №1	50	500	10	2,0
25	Цвет №1	50	500	0	0,0
20	Цвет№2	1	10	10	50,0
15	Цвет №3	1	10	10	50,0
-	Всего	102	1020	30	2,9

Возникает следующие варианты анализа очереди заказов, если общий процент отходов превышает норматив, необходимо убирать из очереди заказы, имеющие максимально высокий процент отходов (например выше 20%), до того момента пока вся очередь будет иметь допустимый уровень потерь (около 4%). Но даже если очередь будет иметь низкий уровень отходов (например 2,9% как в таблице 4.23) это не значит что она оптимальна, поскольку в ней два очень крупных заказа (по 50км) одного типоразмера и два очень мелких заказа

(по 1км). В итоге значительные потери на мелких заказах (отходы 50%) компенсированы экономией на крупном заказе (отходы 2%). Возникает вопрос насколько оправдан такой подход. Для производства в общем то важна итоговая цифра потерь по всей очереди, но если выполнение мелких заказов будет зависеть от наличия крупных, то мелкие клиенты не всегда смогут получить свои заказы, или сложно планировать сроки их изготовления. Также необходимо отслеживать, когда эти мелкие заказы станут в сменное задание, так как в этой смене будет повышенное количество отходов и увеличенная загрузка персонала, возможно следует усилить такую смену более опытными операторами.

Другой вариант появления неоднородной очереди, это когда один клиент одновременно заказал и крупный и мелкий заказ в ассортименте. Такой комплексный заказ необходимо отдельно анализировать и по отходам и по срокам выполнения всех типоразмеров.

Какие либо правила здесь сложно установить, но главным критерием будет загрузка производственных мощностей, общий объем открытых заказов, чем их больше, тем проще отказаться от небольшого заказа и наоборот.

4.4.2 Требование к последовательности изготовления пленок различного цвета

Следует отметить технологическое требование построения очереди от светлых цветов к темным, затем промывка на бесцветный и снова….Как уже указывалось (табл.4.17, 4.18), характер течения влияет на то что остатки цвета могут вымываться большую часть времени которая затрачена на переход. Поэтому если новый цвет более интенсивный или более темный, то даже с остатками предыдущего цвета продукция будет иметь нормальный внешний вид (цвет) для коммерческого использования. Это наглядно показано на рис. 4.20.

№п/п	Фотографии окрашенных пленок	Примечание
1		Исходные пленки/процентное содержание красителя в пленке: 1-голубая / 1% 2-зеленая / 2% 3-белая / 20% 4-черная / 3%
2		Переходы: 1 Черный-зеленый 2 Белый-голубой Черный сильно просвечивает через слабо окрашенный зеленый цвет. Интенсивный белый заметно виден через голубую пленку.
3		Переходы: 1 Голубой-белый 2. Зеленый-черный Более предпочтительная последовательность так как исходный (нижний) цвет почти не виден, черный окрашивает интенсивнее чем белый.

Рис. 4.21. Моделирование различной последовательности переходов по цвету пленки

№п/п	Фотографии окрашенных пленок	Примечание
4		Переходы: 1 – голубой-зеленый 2- белый-черный Слабо окрашенный голубой сильно меняет цвет зеленой пленки. Белый практически не просвечивает через черный цвет.
5		Переходы: 1 Голубой-черный 2 Зеленый-черный 3 Белый-черный Черный хорошо окрашивает любой цвет.
6		Переходы: 1 Голубой-белый 2 Зеленый-белый 3 Черный-белый Белый достаточно интенсивно окрашивает голубой и зеленый, но черный просвечивается, не смотря на высокое содержание красителя в белой пленке.

Рис. 4.22. Моделирование различной последовательности переходов по цвету пленки

Анализ рис. 4.21, 4.22 показывает, что рациональная последовательность переходов по цвету для рассматриваемых окрашенных пленок:

1. Голубой – зеленый - белый- черный
2. Зеленый –голубой -белый- черный

Естественно, что когда один типоразмер выполняется в достаточно большом объеме и отходы на переход снижаются до требуемого уровня, последовательность выполнения может не соблюдаться. Например при нормативе на переход бесцветной пленки 30кг, при объеме заказа на нее 30000кг, отходы снижаются до 0,1% и более важным становится вопрос – не пострадают ли другие клиенты из-за того что производственные мощности загружены одним заказом одного клиента? При средней производительность 50кг/ч заказ будет выполняться 25 суток, если средний срок изготовления заказов составляет 20-30суток, или с другой стороны, средний объем одного заказа одного типоразмера пленки составляет 1000кг, то необходимо выработать правила работы с очень крупными заказами.

4.5 Выводы по четвертому разделу:

1. Современные соэкструзионные установки оснащенные системами гравиметрического дозирования позволяют исследовать параметры течения расплавов для широкой номенклатуры полимерных материалов.
2. Исследование многослойных структур и режимов их получения показывает, что наблюдается практически «пробковый» характер многослойного течения. Отклонение от «пробкового» характера показывает перераспределение заданной и фактической толщины слоя. Толщина внешнего и внутреннего слоя может быть выше на 0,5-3% от заданной по гравиметрии.
3. Низковязкий пристенный слой W2 имеет достаточно стабильную толщину для определенной рецептуры и режимов ее получения. Выявлена тенденция увеличения толщины пристенного слоя с ростом толщины (производительности) соответствующего крайнего слоя.

4. Совершенствование технологии соэкструзии, особенно в условиях единичного и мелкосерийного производства, требует развития моделей многослойного течения с учетом пристенного скольжения расплава.
5. Методы планирования заказов в процессах экструзии в условиях единичного производства, основанные на группировках по цвету, приводит к снижению отходов в 3-5раз. При этом требуется разработка ограничений по срокам изготовления, уровню отходов, уровню качества, количеству номенклатур.
6. Обязательным условием функционирования единичного экструзионного производства является выработка индивидуальных подходов к каждому клиенту, в том числе по основным производственным показателям – допустимому уровню отходов, качеству, минимальному объему заказа.

Заключение

Представление процессов движения расплава в виде пробки скользящей по поверхности, позволило впервые получить описание полной реологической кривой, дать объяснение эффекту дробления поверхности экструдата “sharkskin” и технологическому приему переменной скорости подачи расплава при промывках экструзионного оборудования. В дальнейшем развитии модели полной реологической кривой необходимо учесть молекулярные характеристики полимера, исследовать взаимодействие низковязкого и пристенного слоя, и взаимодействие пристенного слоя с поверхностью каналов течения расплава, найти зависимость характеристик материала покрытия головки со скоростью течения пристенного слоя расплава.

Разработанная модель движения расплава в шнеке экструдера с учетом взаимодействия (вязкого трения) на стенках шнека и цилиндра дает новое понимание процесса и показывает пути совершенствования экструдера. Например интересно исследовать систему экструдер Helibar – шестеренчатый насос расплава. При этом экструдер Helibar можно модернизировать уменьшив отношение L/D и упростить при этом конструкцию шнека. Такая система теоретически должна работать при низких давлениях в экструдере и развивать высокую удельную производительность, быстро и легко промываться при смене рецептур.

Управление современным гибким производственным предприятием должно строиться как минимум с применением системы планирования потребностей в материалах (Materials Requirements Planning, MRP), основные принципы которой JIT (Just In Time – Вовремя заказать) и Kan Ban (Вовремя произвести). В современном единичном соэкструзионном производстве важной задачей становится учет требования каждого клиента, производство индивидуальных конфигураций товаров «под заказ», то есть необходимо внедрять так называемые системы планирования CSRP (customer synchronized resource planning, планирование ресурсов, синхронизированное с клиентом). Важным элементом такой системы является индивидуальный технологический

процесс, разработанный под клиента. Технология (технологические режимы, сырье, требования по качеству и т.д.) должна формироваться при открытии заказа и передаваться в производство, отражаться в сменном задании, контролироваться перед отгрузкой заказа.

Литература

1. Взгляд BASF на упаковочные материалы / др. Аксель Гримм, доклад на 3-м пленочном симпозиуме г. Санкт-Петербург 14.06.2012
2. Wafer-thin layers for giant tasks / magazine Packaging Films., 1-2012 p.6
3. Полимерные пленки: материалы, технологии и назначение, последние тенденции рынка. Специальный выпуск "Все о пленках", [Электронный ресурс] / Отраслевой портал – Unipack.Ru // .Режим доступа http://www.unipack.ru/paper/Plenki_Unipack_Ru2008.pdf
4. Дядичев В.В. Соэкструзионная обработка вторичных полимерных материалов (теория, технология, оборудование) [Текст] : дис. докт. техн. наук / В.В. Дядичев. — Луганск., 2003. — 361с.
5. Admer, Fields of Application [Электронный ресурс] / Официальный сайт MITSUI CHEMICALS EUROPE GMBH//2013. – Режим доступа http://www.admer.de/aboutadmer/fields.php
6. Леваничев, В. В. Комплексный подход к созданию оболочек для колбасных изделий [Текст] / В.В. Леваничев // журнал Мясная индустрия. – 2008. - №5. - с. 44-45.
7. Ульшин, В. А. Анализ процесса переналадки соэкструзионного оборудования с целью минимизации потерь времени [Текст] / В.А. Ульшин, В.В. Леваничев, Т.М. Терещенко // Вестник СНУ им. В.Даля. – 2010. - №9 (151). - с. 43-49.
8. Ульшин, В.А. Экспериментальные исследование влияния качества смешения на характеристики готового изделия [Текст] / В.А. Ульшин, В.В. Леваничев, Т.М. Терещенко, А.В. Леваничев // Вестник СНУ им. В. Даля. – 2012. - №9 (180). – с.194-198.
9. Ульшин, В.А. Исследование процесса течения расплава полимера в каналах соэкструзионного оборудования [Текст] / В.А. Ульшин, В.В. Леваничев, Т.М. Терещенко // Вестник СНУ им. В.Даля. - 2011. - №3 (157). - с. 80-86

10. Efficient extruder and slot-die purging / Beth Foederer [Электронный ресурс] / Официальный сайт Society of Plastics engineers// 2010. - Режим доступа: http://www.4spepro.org/view.php?source=003231-2010-11-03
11. Disco purge procedure for extrusion coaters / [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании Du Pont // 2010.- Режим доступа: http://www2.dupont.com/Surlyn/en_US/assets/downloads/disco_purge_procedure.pdf http://www2.dupont.com/Nucrel/en_US/assets/downloads/disco_purge.pdf
12. Наглядная соэкструзия. / Экструзия технологические новинки/ журнал Пластикс №7 (89) 2010, с.34
13. US6875382B2 Process to purge polymer or plastic melt guiding parts of film extrusion systems/ Reinhard Paetzold, Osnabrueck (DE); Ulrich Krause, Lienen (DE), Windmoeller & Hoelscher, , Lengerich (DE), Appl. No.: 09/954216, заявл. 18 сен 2001 опубл. 5 апр 2005.
14. US005424012A. Method for purging thermoplastic extruders / Raymond T. Ertle; Raymond J. Ertle, both of Pompton Plains, N.J. Assignee: Cylatec Corp., Pompton Plains, N.J. Appl. No.: 179,978 заявл. 11 янв 1994, опубл. 13 июн 1995.
15. US008080506B2 Reactive purge compound for polymer purging / Mitsuzo Shida, Long Grove, IL (US); Assignee: MSI Technology LLC., APP1-NO" 12/502,556 заявл. 14 июл 2009, опубл. 20 дек 2011.
16. US006673759B CLEANING MATERIAL FOR EXTRUDERS / Uwe Koch, Gerolsheim (DE); Rainer Klenz, Hassloch (DE); Peter Friel, Frankenthal (DE); Brigitte Gareiss, Obersiilzen (DE)/ Assignee: BASF Aktiengesellschaft, Appl. No.: 09/868,096 заявл. 14 июн 2001 опубл. 6 янв 2004
17. US006916770B2 Multi-functional color concentrate compositions / Norman E. Nitzsche, Willard, OH (US), Assignee: Polyone Corporation, Avon Lake, OH (US), Appl. №: 10/150, 305 заявл. 17 май 2002, опубл. 12 июл 2005.
18. US4954545 Process for cleaning polymer processing equipment /Fay W. Bailey, Bartlesville, Okla. Assignee: Phillips Petroleum Company, Bartlesville, Okla. Appl. No.: 283350 заявл. 12 дек 1988, опубл. 4 сен 1990.

19.US6060445A Polymer cleaning compositions and methods. /Vinay Kumar Chandraker, Houston, Tex.; Hidemasa Oda, Okayama, Japan. Assignee: EVAL Company of America, Appl. No.: 08/829401 заявл. 31 мар 1997, опубл. 9 май 2000.
20.Прогресс в экструзии на NPE [Электронный ресурс] / Официальный сайт Интернет-портал Polymery.ru / 07.12.2007 Режим доступа http://www.polymery.ru/blog.php?id_company=54&n_id=1965&category=item&page=91
21.Экструзия без мертвых зон / Экструзия технологические новинки/ журнал Пластикс №7 (89) 2010, с.33
22.US006019916A Manufacturing method of different color pellets and manufacturing apparatus therefore. Hideki Mizuguchi; Masaharu Ishida, both of Hiroshima, Japan. The Japan Steel Works, Ltd. Tokyo, Japan. Appl. No.: 08/987,423 заявл. 9 дек 1997, опубл. 1 фев 2000
23.US008187512B2 Method and device for granulating plastics and/or polymers./ : Milchaei Eloo: Xaiiieii (DE); Assignee: Gala Industries, Inc., Eagle Rock Appl. No -I 11/884462 заявл.15 фев 2006, опубл. 29 май 2012
24.US5486327 Apparatus and method for injecting or extruding colored plastic / Peter F. Bemis; Loren C. Albrecht; Steven F. Schick, all of Sheboygan, Wis. Assignee: Bemis Manufacturing Company, Sheboygan Falls, Wis. Appl. No.: 184,826, заявл. 21 янв 1994 опубл. 23 янв 1996.
25.US005879720A GRANULATING DEVICE FOR THERMOPLASTIC RESIN / Minoru Yoshida; Hideki Mizuguchi; Nobuhisa Kobayashi; Masaharu Ishida, all ol Hiroshima, Japan., Assignee: The Japan Steel Works, Ltd., Tokyo, Japan , Appl. No.: 20,383
26.UA81589C2 Екструзійна голівка для виробництва розсувної рукавної плівки/ Маглер Франц, Байер Крістіан, Гейнекер Михаель, Литовські Йохим,. Хокосава Алпін акцієнгезелльшафт. заявл 17.08.2005 опубл. 10.01.2008

27. Агапкин В.М. Трубопроводный транспорт мазута [Электронный ресурс] / сайт «НЕФТЬ-ГАЗ электронная библиотека» // Режим доступа: http://www.dobi.oglib.ru/bgl/4477/53.html
28. UA18494U Спосіб екструзії полімерних матеріалів / Сівецький Володимир Іванович, Сокольський Олександр Леонідович, Сівецький Андрій Володимирович, Національний Технічний Університет України "Київський Політехнічний Інститут" заявл. 27.04.2006 опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11, 2006 р.
29. Концентраты экструзионных (процессинговых) добавок "Баско" П0025 [Электронный ресурс] / Официальный сайт ООО НПФ «Барс-2» // 2013. – Режим доступа: http://bars2.com/colors/marks/p0025/
30. On Cap Additives for Blow Molding [Электронный ресурс] / Официальный сайт PolyOne Plastic Compounds // 2013. – Режим доступа: http://www.polyone.com/en-us/products/colorantadditive/Pages/default.aspx
31. Screw coatings [Electronic resource] / The official website company Bernex Bimetall AG, 2016.- Available at: http://www.bernexgroup.com/mm/coating.pdf
32. P.CrN PVD high-performance coatings [Электронный ресурс] / Официальный сайт фирмы Oerlikon Metco, Швейцария //2016 Режим доступа http://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-services/pvd-coatings/pvd-coatings-processes/
33. Раувендаль, К. Экструзия полимеров [Текст] / К. Раувендаль; под ред. А.Я. Малкина; пер. с англ. – СПб.: Профессия, 2008. – 768 с.
34. Тадмор, З. Теоретические основы переработки полимеров [Текст] / З. Тадмор, К. Гогос; пер. с англ. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
35. Hammarström, D. A Model for Simulation of Fiber Suspension Flows [Text] / D. Hammarström // KTH Mechanics, Royal Institute of Technology SE-10044 Stockholm, Sweden, 2004. – 125 p.
36. Виноградов, Г. В. Реология полимеров [Текст] / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. – М. Химия, 1977. – 434 с.

37. Чанг, Д. Реология в процессах переработки полимеров [Текст] : пер. с англ. под ред. Г.В.Виноградова и М.Л. Фридмана.- М.: Химия, 1979.-368с.
38. Дядичев, В. В. Методика описания реологии расплава полимера в широком диапазоне скоростей сдвига [Текст]: зб. наук. пр. ч. 2/ В. В. Дядичев, В. В. Леваничев, Т. М. Терещенко// Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. – Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2003. – С. 68–72.
39. Weio, C. Effect of micro-viscosity and wall slip on polymer melt rheology inside micro-channel [Electronic resource] / C. Weio, S.Yaqiang, L. Chunqian, L. Qian, S.Changyu / Материалы конференции ANTEC, 2011. – Режим доступа: http://www.plasticsengineering.org/polymeric/node/4897/. – Загл. с экрана.
40. Hatzikiriakos, S. G. Wall slip of molten high density polyethylene [Electronic resource] / S. G. Hatzikiriakos, J. M. Dealy // Department of Chemical Engineering, McGill University, 1991. – Available at: http://www.chem.mtu.edu/~fmorriso/cm4655/Hazikiriakos_Dealy.pdf/. – Title from the screen.
41. Раувендааль, К. Выявление и устранение проблем в экструзии [Текст] / К. Раувендааль; под ред. В. П. Володина; пер с англ. – Спб.: Профессия, 2008. – 328 с.
42. Brian Black, W. Wall slip and boundary effects in polymer shear flows [Electronic resource] / W. Brian Black. – A dissertation at the University of Wisconsin – Madison, 2000. – Available at: http://grahamgroup.che.wisc.edu/pub/black_dissert.pdf
43. Michaeli, W. Extrusion dies for plastics and rubber: design and engineering computations [Текст] / Hanser Publishers, Munich, 1992. - 340с.
44. Screw and barrel combinations [Electronic resource] / The official website company Bernex Bimetall AG, 2015.- Available at: http://www.bernexgroup.com/mm/Barrel-Screwcombination1.pdf

45.Bonten, C. Resource Efficiency in Plastics Technology [Electronic resource] / C. Bonten, Oliver Kast // Institut für Kunststofftechnik Stuttgart, Germany / По материалам Motiva Group, Helsinki, 2015. - Режим доступа: http://www.motiva.fi/files/9729/02_Resource_efficiency_in_plastics_industry_Bonten_Kast.pdf

46.UA43672U Спосіб прогнозування властивостей епоксидної композиції, одержаної з використанням ультразвукової модифікації / Колосов Олександр Євгенович, Національний Технічний Університет України "Київський Політехнічний Інститут". заявл 03.04.2009 опубл. 25.08.2009, Бюл.№ 16, 2009 р.

47.Barrier Biax Film Lines [Electronic resource] / The official website company Macro, Canada, 2016.- Available at: http://www.macroeng.com/barrier-triple-bubble-lines.php

48.Ким, В.С. Диспергирование и смешение в процессах производства переработки пластмасс [Текст] / В.С. Ким, В.В. Скачков. – М.: Химия, 1988. – 240с.

49.Торнер, Р.В. Оборудование заводов по переработки пластмасс [Текст] / Р.В. Торнер, М.С. Акутин. - М.: Химия, 1986. – 400с.

50.Оборудование для переработки сыпучих материалов : учебное пособие / В.Я. Борщев, Ю.И. Гусев, М.А. Промтов, А.С. Тимонин. – М. :«Издательство Машиностроение-1», 2006. – 208 с.

51.Шубин И.Н., Свиридов М.М., Таров В.П. Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 76 с.

52.Техника переработки пластмасс [Текст] / под ред. Н.И. Басова и В. Броя – М. Химия, 1985г. 528с.

53.Методика оценки качества смешения [Электронный ресурс]/ Официальный сайт Института Новых Технологий и Автоматизации промышленности строительных материалов (ООО «ИНТА – СТРОЙ», Омск, Россия // 21.05.2012 Режим доступа http://www.inta.ru/mass-media/news/metodika-otsenki-kachestva-smesheniya/?print=Y

54. Физико-механические показатели полиамидных (ПА-6) мононитей [Электронный ресурс] / Официальный сайт ОАО "Черниговское ХИМВОЛОКНО"// 2013 Режим доступа http://www.him.com.ua/production/prod05.html.
55. Леваничев, В. В. Исследование влияния качества смешения на физико-механические характеристики пленочных материалов [Текст] / В.В. Леваничев, Т.М. Терещенко // Вісник СНУ ім. В.Даля. – 2010. - №2 (144). – С.91-95.
56. Ульшин, В.А. Критерии качества смешения многокомпонентной системы [Текст] / В.А. Ульшин, В.В. Леваничев, Т.М. Терещенко, А.В. Леваничев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т.6, №6(60). – с. 28-31. – Режим доступа: http://journals.uran.ua/eejet/issue/view/352
57. Черпаков, Б.И. Эксплуатация автоматических линий [Текст] / Б.И Черпаков – М.: Машиностроение, 1990. – 304с.
58. Яковлев, А.Д. Технология изготовления изделий из пластмасс [Текст]/ А.Д. Яковлев – Ленинград: Химия, 1972. 344с.
59. Торнер, Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) [Текст]/ Р.В.Торнер -М.:Химия, 1977. - 464с.
60. Altınkaynak, A. Melting in a Single Screw Extruder: Experiments and 3D Finite Element Simulations [Текст] / A. Altınkaynak, M. Gupta, M.A. Spalding, S.L. Crabtree / Журн. International Polymer Processing XXVI ч.2., 2011.- С.182-196.
61. Process temperature specifications – a sad story [Электронный ресурс]/ Технический журнал AIMCAL.- Режим доступа: http://www.convertingquarterly.com/blogs/substrate-secrets/id/5173/process-temperature-specifications-a-sad-story.aspx/ 26.01.2013- Загл. с экрана.
62. Леваничев, В.В. Управление температурой расплава в процессах соэкструзии [Текст]/ В.В. Леваничев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013.- Т.5, №5(65). – с.3-5 – Режим доступа: http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18100/15848

63. Ульшин, В.А. Гравиметрические системы дозирования в соэкструзии, новые технологические параметры процесса [Текст] / В.А. Ульшин, В.В. Леваничев, Т.М. Терещенко, А.В. Леваничев // Вестник СНУ им. В. Даля. – 2012. - №3 (174).ч.2. – с. 175-179.
64. Леваничев, В.В. Исследование барьерных свойств полиамидных оболочек [Текст]/ В. В. Леваничев, Т.И. Ларченкова // Мясное дело. – 2003. – № 1. – С. 10–11.
65. Леваничев В. В. Исследование процесса термоусадки в полиамидных колбасных оболочках / В. В. Леваничев, Т. И. Ларченкова, А. В. Шаповалова // Мясное дело. – 2002. – № 3. – С. 8–9.
66. Бактерицидна ковбасна оболонка на основі поліамідів [Текст] : пат. 54505 UA МПК A22C 13/00 / В.В. Леванічев, К.В. Криуля, власник ТОВ «Поли-Пак». заяв. №u201006310 25.05.2010, публ. 10.11.2010 бюл №21. 10 с.
67. Багатошарова двовісноорієнтована рукавна оболонка для упакування харчових продуктів.[Текст] : пат. 54503 UA МПК A22C 13/00. / В.В. Леванічев, К.В. Криуля, власник ТОВ «Поли-Пак» , заяв №u201006308 25.05.2010, публ. 10.11.2010 бюл. №21. 10с.
68. Терещенко Т.М. Совершенствование технологии и оборудования переработки вторичных полимерных материалов комбинированным выдавливанием [Текст] : дис. канд. техн. наук / Т. М. Терещенко — Луганск., 2007. — 196 с.
69. Леваничев, В.В. Математическая модель процесса течения полимера в кольцевых распределительных каналах экструзионных головок [Текст] / В.В. Леваничев, Т.М. Терещенко, А.В. Гапонов // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр.- СНУ ім. В.Даля, 2009.- С.229-238.
70. Леваничев, В.В. Результаты математического моделирования течения полимера в каналах экструзионных головок [Текст] / В.В. Леваничев, Т.М. Терещенко, А.В. Гапонов // Збірка матеріалів V Міжнародної

науково-технічної web-конференції «Композиційні матеріали» – Київ, 2010. – С. 75-77.

71. Леваничев, В.В. Исследование характеристик кольцевого распределительного канала экструзионной головки / В.В. Леваничев, К.Н. Сафронов, И.В. Дядичева, Вісник СНУ ім. В.Даля. – 2010. - №9 (151). – с. 59-65.

72. Леваничев, В. Модель течения расплава полимера [Текст] / В. Леваничев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 4, № 7 (64). – С. 39–41. – Режим доступа: http://journals.uran.ua/eejet/article/view/16685/14175

73. Леваничев, В. Анализ полной реологической модели течения расплава полимера [Текст] / В. Леваничев // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 2, № 6 (74). – С. 11-16. – Режим доступа: http://journals.uran.ua/eejet/article/view/38951/37879

74. Тагер, А. А. Физико-химия полимеров [Текст] / А. А. Тагер; изд. 4-е. – М.: Научный мир. 2007. – 576 с.

75. Леваничев, В.В. Разработка модели движения расплава в экструдере [Текст] / В.В. Леваничев // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. - Т. 5, № 5 (77). – с.7-13. - Режим доступа: http://journals.uran.ua/eejet/issue/view/3038

76. Levanichev, V. Study of multi-layer flow in coextrusion processes [Text] / V. Levanichev // TEKA Commission of motorization and power industry in agriculture. – 2014. – Vol. 14, Issue 1. – P. 144–153. – Available at: http://www.pan-ol.lublin.pl/wydawnictwa/TMot14_1/Teka_14_1.pdf

77. US7083321 Single screw extruder. / Eberhard Grunschloss. Assignee: Krauss-Maffei Kunststofftechnik Gmbh, Appl. No.: US 10/600,217.

78. Single screw extruder range Helibar U [Electronic resource] / The official website company Komax, 2015.- Available at: http://www.komax.pro/en/extrusion/extruder-long-helical-grooves

79.HELIBAR®- single-screw extruders [Electronic resource] / The official website company EXTRUDEX GmbH , 2015.- Available at: http://extrudex.de/en/helibar

80.HELIBAR® Plastification Unit [Electronic resource] / Official site of company HELIX GmbH, 2015.- Available at: http://www.helixgmbh.com/index.php?id=7&lang=en

81.EXTRUDEX introduces economic single-screw HELIBAR® extruder at K 2010 [Electronic resource] / The official website company Messe Düsseldorf GmbH, 2010.- Available at: http://www.k-online.com/

82.Колосов, А.Н. Организация и экономика гибкого автоматизированного производства [Текст] / А.Н. Колосов; учеб пособие. – К.: Выща шк., 1991.- 167с.

83.Леваничев В.В. Планирование заказов в единичном экструзионном производстве / В.В. Леваничев, Е.Й. Гиркин, А.В. Леваничев, // Вестник СНУ им. Даля. – 2012. - №3 (174) ч.2. – С. 65-70.

Для заметок

Для заметок

Научное издание

Леваничев Виталий Валерьевич

Разработка технологии совместной экструзии в условиях единичного производства

Монография

План 2016 г., поз.

Подп. к печати 01.03.2016. Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. лист. 13,75.
Тираж 300 экз. Зак. №18-16. Цена договорная.

Видавництво «Технологічний Центр»
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи ДК № 4452
від 10.12. 2012 р.
Адреса: 61145, м. Харків, вул. Шатилова дача, 4